



**Universidad  
Andrés Bello**

Universidad Andrés Bello

Facultad de Ingeniería

Carrera de Geología

**“NIVELES DE CENIZAS VOLCÁNICAS EN LADERAS DE LOS  
VALLES DE RÍO CLARO Y COCHIGUÁS, QUEBRADA PAIHUANO  
Y TRES CRUCES, REGIÓN DE COQUIMBO, CHILE”.**

Memoria para optar al título de Geólogo

Gustavo David Barrientos Saldes

Profesor guía:

Mauricio Calderón Nettle

Miembros de la comisión:

Francisco Fuentes Iza

Cristóbal Ramírez de Arellano

Santiago, Chile

2018

## Resumen

Hacia el interior de la región de Coquimbo, en los valles de los ríos Claro y Cochiguás, quebradas Paihuano y Tres Cruces (ca. 30°S), se encuentran niveles de ceniza volcánica intercalados con depósitos coluviales, bajo una cobertura aluvial holocena. Esta zona se caracteriza por estar inmersa en un segmento de subducción plana, caracterizada por la ausencia de volcanismo en los Andes, por lo que la ocurrencia de estos depósitos es inusual. En este trabajo se realizaron análisis granulométricos, de componentes y mineralógicos de seis depósitos de cenizas volcánicas. Además, se consideraron análisis geoquímicos de elementos mayores realizados en esquirlas de vidrio volcánico. Los niveles de cenizas volcánicas están compuestos principalmente por esquirlas de vidrio de tamaños variables entre 2 – 0.063 mm (predominantemente < 125  $\mu$ m) que varían entre 67 - 74% del material que las constituye. El resto de los componentes corresponden a proporciones variables de cuarzo, feldespatos, biotita y trazas de muscovita, titanita, anfíbola y sulfuros de cobre. Los feldespatos están parcialmente argilizados, algunos presentan pátinas de sulfuros de cobre, mientras que la biotita y anfíbola están levemente oxidadas. Lo anterior permite considerar que los minerales observados, en su mayoría, corresponden a material proveniente de rocas intrusivas circundantes. Considerando además la presencia de clastos de roca en los depósitos, se interpreta que los niveles de cenizas corresponden a depósitos mixtos, formados por material volcánico y accidental. El origen del vidrio volcánico estaría asociado a una erupción variable entre pliniana y freatomagmática, con desarrollo de una pluma de cenizas, que habría formado depósitos de caída en las zonas altas de los paleo valles y paleo quebradas, los que posteriormente habrían sido removilizados y depositados en su ubicación actual. Las esquirlas de vidrio tienen composición riolítica con afinidad calcoalcalina de alto potasio, característica de productos volcánicos de arco. Se destaca la semejanza composicional de éstos con los depósitos asociados al evento eruptivo de la Caldera El Diamante (ca. 34°S), por lo que en este trabajo se propone que posiblemente el material piroclástico estudiado habría recorrido ca. 470 km de distancia desde su fuente.

## **Abstract**

Towards the interior of the Coquimbo region, in the valleys of the Claro and Cochiguás rivers, Paihuano and Tres Cruces creeks, levels of volcanic ash interleaved with colluvial deposits are found, under an holocene alluvial cover. This area is characterized by being immersed in a flat-slab segment, characterized by the absence of volcanism in the Andes, so the occurrence of these deposits is unusual. In this work granulometric analysis, components and minerals of six levels of volcanic ash are performed. In addition, geochemical analyses of major elements made of volcanic shard glass were considered. The levels of volcanic ash are mainly composed of glass shard of varying sizes between 2- 0.063 mm (predominantly <125 microns) that vary between 67 - 74% of the material that constitutes them. The rest of the components correspond to variable proportions of quartz, feldars, biotite and traces of muscovite, titanite, amphibole and copper sulphides. Feldars are partially argilized, some have patina of copper sulphides, while biotite and amphibole are slightly oxidized. The above allows to consider that the minerals observed, mostly, correspond to a material coming from surrounding intrusive rocks. Also considering the presence of rock clasts in the deposits, it is interpreted that the ash levels correspond to mixed deposits, formed by volcanic and accidental material. The origin of the volcanic glass would be associated to a variable eruption between plinian and phreatomagmatic, with the development of an ash plume, that would have formed deposits of fall in the high zones of paleo valleys and paleo creeks, which later would have been remobilized and deposit in the current location. The glass shards have rhyolitic composition with high potassium calcoalkaline affinity, characteristic of arc volcanic products. The compositional similarity of these with the deposits associated with the eruptive event of Caldera El Diamante (ca.34°S) is highlighted, so in this work it is proposed that possibly the pyroclastic material studied would have travelled ca. 470 km away from tis source.

## **Agradecimientos**

Agradezco al Laboratorio L.A.S. por permitir el análisis de la gran parte de este trabajo, a Poldie Oyarzún por la paciencia, la buena disposición siempre para coordinar los horarios y por la simpatía que la caracteriza. A Daniela Pla y Jonathan Fuentes por permitir el uso de los laboratorios de Geología, siempre recibiendo con los brazos abiertos y sin ningún problema para el uso de la lupa y los tamices.

Agradezco al profesor Mauricio Calderón, por el apoyo que siempre brindó durante el proceso del desarrollo de esta tesis, colaborando con sus conocimientos, su excelente disposición y siempre las buenas energías ante todo, de verdad estoy muy agradecido de haber realizado la tesis con usted como guía. A los profesores Francisco Fuentes y Cristóbal Ramírez, que siempre aportaron con ideas excepcionales y buenos comentarios para el desarrollo de este trabajo, siempre con buena disposición y la gran simpatía que los caracteriza.

Agradecer a Caro, que es una de las mejores personas que he conocido en mi vida, te agradezco por todo, tú sabes todo lo que hemos vivido en este camino, si alguien me enseñó cómo se debe luchar, tú eres el mejor ejemplo de eso, además de haber sido un pilar fundamental junto a Oscar, uno de mis mejores amigos y una gran persona que conocí en la universidad, eres un grande, te agradezco todo lo entregado y que hayas sido parte de este camino, fuiste fundamental en el desarrollo y término de la carrera. Maca, de mis mejores amigas y excelente persona, siempre estaré agradecido de todo lo que hemos vivido, a Cris y Huesitos, que son unos grandes amigos míos, gracias por todo. Xavi, Sergio y Carlos, que, a pesar de habernos conocido en el último tiempo, los considero unas personas espectaculares, y agradezco siempre por sus buenos momentos, por su buena onda, ayuda y por el apoyo en general. Angelo, tú sabes lo fundamental que fuiste al haberme ayudado con los detalles que en ese momento eran difíciles para mí. A Álvaro siempre por facilitar la información que a veces requería y no podía encontrar, y por facilitar el uso de su tesis en este trabajo. Agradecer a José Luis Antinao, por facilitar los análisis geoquímicos que permitieron un mejor desarrollo de este trabajo.



Finalmente, y lo más importante, agradecimientos especiales a mi familia, papá siempre me has apoyado en todas las decisiones que he tomado, mamá también con tu apoyo a mis decisiones y siempre con el cariño que te caracteriza, Dany por todos los años, Tatán por tu excepcional apoyo y cariño, y mis hermanos Benja y Mile. Gracias a ustedes soy la persona que actualmente soy, ustedes son y siempre serán los pilares fundamentales de para dar el paso a cualquier decisión que tome. Me han brindado el apoyo necesario para el desarrollo de esta carrera que ya está casi terminando, estaré siempre agradecido de todos ustedes.

Cami, mi amor, tú sabes lo que significa esto, tu eres mi pilar fundamental, y sabes que siempre estaré agradecido de ti y de tu familia, por haberme acogido cuando me vine a estudiar y vivir solo. Tu apoyo ha sido fenomenal, siempre estuviste cuando más lo necesité y sabes que yo esas cosas las valoro. No es necesario escribir nada más, tú lo sabes todo. Gracias por todo.

# Índice de Contenido

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1.    | Introducción .....   | 1  |
| 1.1   | Formulación del problema .....                                     | 1  |
| 1.2   | Hipótesis.....   | 3  |
| 1.3   | Objetivos .....  | 3  |
| 1.3.1 | Objetivo General.....  | 3  |
| 1.3.2 | Objetivos Específicos .....  | 3  |
| 1.4   | Ubicación y accesos.....   | 4  |
| 1.5   | Metodologías .....   | 5  |
| 1.5.1 | Granulometría y Componentes.....                                   | 6  |
| 1.5.2 | Mineralogía y Morfología de vidrio volcánico .....                 | 6  |
| 2.    | Antecedentes geológicos .....                                      | 8  |
| 2.1   | Rasgos morfoestructurales regionales .....                         | 8  |
| 2.2   | Marco geotectónico en la Región de Coquimbo.....                   | 11 |
| 2.2.1 | Evolución tectónica del Jurásico-Paleógeno.....                    | 12 |
| 2.2.2 | Evolución tectónica del Neógeno.....                               | 13 |
| 2.3   | Marco geológico local.....   | 14 |
| 2.3.1 | Basamento.....   | 16 |
| 2.3.2 | Formaciones Volcánicas del Paleozoico Superior – Triásico Inferior | 18 |
| 2.3.3 | Formaciones Marinas Jurásico Inferior-Medio.....                   | 19 |
| 2.3.4 | Marco Glaciológico .....   | 19 |
| 3.    | Marco Teórico .....  | 21 |
| 3.1   | Grandes erupciones (explosivas) .....                              | 21 |
| 3.2   | Ceniza volcánica .....   | 22 |

|  |    |
|--|----|
| 3.3 Estilos de erupción .....                                    | 22 |
| 3.3.1 Efusivas y explosivas.....                                 | 22 |
| 3.3.2 Estilos de erupciones explosivas: caída y flujo.....       | 23 |
| 3.4 Transporte de las cenizas en la atmósfera.....               | 26 |
| 4. Resultados .....  | 28 |
| 4.1 Depósitos de cenizas volcánicas.....                         | 28 |
| 4.1.1 Punto C1 .....   | 30 |
| 4.1.2 Punto C2.....  | 31 |
| 4.1.3 Punto C3.....  | 32 |
| 4.1.4 Punto C4.....  | 32 |
| 4.1.5 Punto C5.....  | 34 |
| 4.1.6 Punto C6.....  | 35 |
| 4.2 Análisis Granulométrico.....                                 | 36 |
| 4.3 Componentes .....  | 38 |
| 4.3.1 Localidad: Pisco Elqui.....                                | 38 |
| 4.3.2 Localidad: Valle del Río Cochiguás .....                   | 39 |
| 4.3.3 Localidad: Quebrada Tres Cruces.....                       | 40 |
| 4.3.4 Localidad: Quebrada Paihuano .....                         | 41 |
| 4.4 Análisis mediante Difracción de Rayos X (DRX) .....          | 44 |
| 4.4.1 Mineralogía .....  | 44 |
| 4.4.2 Amorfos .....  | 50 |
| 4.5 Caracterización microscópica de las cenizas volcánicas ..... | 51 |
| 4.5.1 Pisco Elqui .....  | 51 |
| 4.5.2 Valle del Río Cochiguás .....                              | 54 |
| 4.5.3 Quebrada Tres Cruces .....                                 | 57 |

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| 4.6 | Geoquímica de elementos mayores .....  | 61  |
| 5.  | Discusión .....  | 68  |
| 5.1 | Naturaleza de los depósitos. ....  | 68  |
| 5.2 | Mecanismos eruptivos, naturaleza de la erupción y del magma. ....  | 69  |
| 5.3 | Comparación geoquímica con depósitos asociados al Campo Volcánico Pocho y al evento eruptivo Caldera El Diamante. .... | 70  |
| 6.  | Conclusiones .....   | 77  |
|     | Referencias.....   | 78  |
|     | ANEXO I .....  | 88  |
|     | ANEXO II .....   | 90  |
|     | ANEXO III .....  | 101 |
|     | ANEXO IV .....   | 108 |

# Índice de Figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1: Depósitos riolíticos y dacíticos de Chile central. Se incluyen puntos de los depósitos de este trabajo. ....  | 2  |
| Figura 2: Ubicación zona de estudio .....   | 4  |
| Figura 3: Mapa de vías de acceso .....  | 5  |
| Figura 4: Modelo de elevación digital con divisiones esquemáticas en 2 unidades morfoestructurales principales separadas por la zona de falla Vicuña: Cordillera de la Costa y Cordillera Principal, ésta última dividida en dos subunidades: Occidental y Oriental. En el cuadro rojo se presenta la zona de estudio (modificado de Gómez, 2015). ....   | 10 |
| Figura 5: Mapa geológico local de la zona de estudio, modificado de la Hoja Pisco Elqui (Mpodozis y Cornejo, 1988), Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile. ....  | 15 |
| Figura 6: Extraído y modificado de Wilson C. 2008. Esquemas de los estilos mayores de erupción volcánica. A) Actividad efusiva produciendo un domo de lava (Pohaturua, Nueva Zelanda), edificio volcánico pareciera estar erodado. B) Actividad de caída de una pluma flotante (1.8 ka erupción Taupo, Nueva Zelanda). C) Flujo piroclástico, con una pluma como fuente (acompañado por una pluma secundaria rica en ceniza fina; Valle de los Diez mil Humos, Alaska). D) Colapso de la roca caja dentro de una cámara magmática vacía durante o después de la erupción de una caldera, expresado en la topografía por una depresión (0.76 Ma erupción Long Valley, California)..... | 25 |
| Figura 7: Pluma derivada de un centro emisor.....   | 26 |
| Figura 8: Pluma con densidad de corriente co-piroclástica. ....   | 27 |
| Figura 9: Zona de estudio y puntos de muestreo (C1, C2, C3, C4, C5, C6). En los valles de los ríos Claro y Cochiguás, Quebrada Tres Cruces y Quebrada Paihuano. ....  | 29 |
| Figura 10: Columna estratigráfica representativa del afloramiento en el Punto C1, Localidad de Pisco Elqui. ....  | 30 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 11: Columna estratigráfica representativa del afloramiento en el Punto C2, Localidad de Pisco Elqui. ....  | 31 |
| Figura 12: Columna estratigráfica representativa del afloramiento en el Punto C3, Localidad de Valle del Río Cochiguás. ....  | 32 |
| Figura 13: Columna estratigráfica representativa del afloramiento en el Punto C4, Localidad de Valle del Río Cochiguás. ....  | 33 |
| Figura 14: Columna estratigráfica representativa del afloramiento en el Punto C5, Localidad de Quebrada Tres Cruces. ....   | 34 |
| Figura 15: Columna estratigráfica representativa del afloramiento en el Punto C6, Localidad de Quebrada Paihuano. ....  | 35 |
| Figura 16: Curva granulométrica del % en peso acumulado por diámetro de partículas. ....  | 37 |
| Figura 17: Diagrama JCL (Juveniles-Cristales-Líticos, modificado del diagrama Pómez-Cristales-Líticos) para las muestras analizadas que corresponden a la fracción 180 $\mu\text{m}$ . .... | 43 |
| Figura 18: Diagrama JCL (Juveniles-Cristales-Líticos, modificado del diagrama Pómez-Cristales-Líticos) para las muestras analizadas que corresponden a la fracción 63 $\mu\text{m}$ . ....  | 44 |
| Figura 19: Difractograma evaluado mediante Diffrac Suite EVA para muestra C1. ....  | 45 |
| Figura 20: Difractograma evaluado mediante Diffrac Suite EVA para muestra C2. ....  | 46 |
| Figura 21: Difractograma evaluado mediante Diffrac Suite EVA para muestra C3. ....  | 46 |
| Figura 22: Difractograma evaluado mediante Diffrac Suite EVA para muestra C4. ....  | 47 |
| Figura 23: Difractograma evaluado mediante Diffrac Suite EVA para muestra C5. ....  | 48 |
| Figura 24: Gráfico de contenido de mineralogía semicuantitativa en las muestras C1 a C5. ....   | 49 |
| Figura 25: Gráfico de contenido de amorfos y cristalinidad por muestra. ....  | 50 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 26: Imagen de Electrones Secundarios (ES) obtenidas en MEB en muestra C1. En rojo se presentan esquirlas de vidrio planas, cubiertas por partículas de arcilla.....  | 52 |
| Figura 27: Imagen de Electrones Secundarios (ES) obtenidas en MEB en muestra C1. En azul se presenta la vista lateral de una esquirla blocosa escalonada, cubiertas por partículas de arcilla.....  | 53 |
| Figura 28: Imagen de Electrones Secundarios (ES) obtenidas en MEB en muestra C3. En color anaranjado se presenta una esquirla pumícea fibrosa con canales de degasificación muy bien marcados y en color rojo una esquirla de vidrio blocosa.   | 55 |
| Figura 29: Imagen de Electrones Secundarios (ES) obtenidas en MEB en muestra C3. Se presentan esquirlas vesiculares. ....   | 56 |
| Figura 30: Imagen de Electrones Secundarios (ES) obtenidas en MEB en muestra C5. Se presenta en color anaranjado una esquirla pumícea y en blanco una esquirla vesicular. ....  | 58 |
| Figura 31: Imagen de Electrones Secundarios (ES) obtenidas en MEB en muestra C5. Se presenta en color anaranjado una esquirla pumícea y en blanco una esquirla blocosa. ....  | 59 |
| Figura 32: Imagen de Electrones Secundarios (ES) obtenidas en MEB en muestra C5. Se presenta en blanco una esquirla blocosa. ....   | 60 |
| Figura 33: Diagrama de clasificación $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ versus $\text{SiO}_2$ para rocas volcánicas TAS (Total álcalis vs sílice) (Le Bas et al., 1986). Se exponen las muestras analizadas en este trabajo.....        | 62 |
| Figura 34: Diagrama de las series magmáticas alcalina y subalcalina propuesto por Irvine & Baragar (1971). La simbología es la misma de la Figura 33. ....  | 63 |
| Figura 35: Diagrama AFM. Curva azul limita la serie calcoalcalina de la serie toleítica (Irvine y Baragar, 1971), curva roja limita la serie calcoalcalina de la serie toleítica (Kuno, 1968). La simbología es la misma que la Figura 33. .... | 64 |
| Figura 36: Diagrama $\text{K}_2\text{O}$ versus $\text{SiO}_2$ (Kuno, 1968). La simbología es la misma que la Figura 33. ....   | 65 |
| Figura 37: Diagramas de Harker para óxidos de elementos mayores para los depósitos de cenizas de este estudio.....  | 66 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 38: Diagrama TAS (Total álcalis vs sílice) (Le Bas et al., 1986). Se exponen las muestras analizadas en este trabajo, el trabajo de Kay y Gordillo (1994) corresponde al Campo Volcánico Pocho, y los demás autores corresponden a estudios en los depósitos piroclásticos asociados al evento eruptivo Caldera El Diamante. .... | 73 |
| Figura 39: Diagrama de las series magmáticas alcalina y subalcalina propuesto por Irvine & Baragar (1971). La simbología es la misma de la Figura 38. ....   | 74 |
| Figura 40: Diagrama AFM. Curva azul limita la serie calcoalcalina de la serie toleítica (Irvine y Baragar, 1971), curva roja limita la serie calcoalcalina de la serie toleítica (Kuno, 1968). La simbología es la misma que la Figura 38. ....  | 75 |
| Figura 41: Diagrama K <sub>2</sub> O versus SiO <sub>2</sub> (Kuno, 1968). La simbología es la misma que la Figura 38. ....  | 76 |

## Índice de Tablas

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1: Etapas y subetapas del ciclo andino, con sus eventos tectónicos característicos (extraído de Charrier et al., 2009) ..... | 11 |
| Tabla 2: Coordenadas GPS en UTM de los puntos de muestreo.....   | 29 |
| Tabla 3: Tabla resumen de componentes por muestra .....  | 42 |
| Tabla 4: Contenido de fases minerales en % semicuantitativo para muestra C1, no se toma en cuenta el % de amorfos. ....            | 45 |
| Tabla 5: Contenido de fases minerales en % semicuantitativo para muestra C2, no se toma en cuenta el % de amorfos. ....            | 46 |
| Tabla 6: Contenido de fases minerales en % semicuantitativo para muestra C3, no se toma en cuenta el % de amorfos. ....            | 47 |
| Tabla 7: Contenido de fases minerales en % semicuantitativo para muestra C4, no se toma en cuenta el % de amorfos. ....            | 47 |
| Tabla 8: Contenido de fases minerales en % semicuantitativo para muestra C5, no se toma en cuenta el % de amorfos. ....            | 48 |
| Tabla 9: Tabla resumen de las morfologías de vidrio volcánico observado en cada muestra .....                                      | 61 |



# 1. Introducción

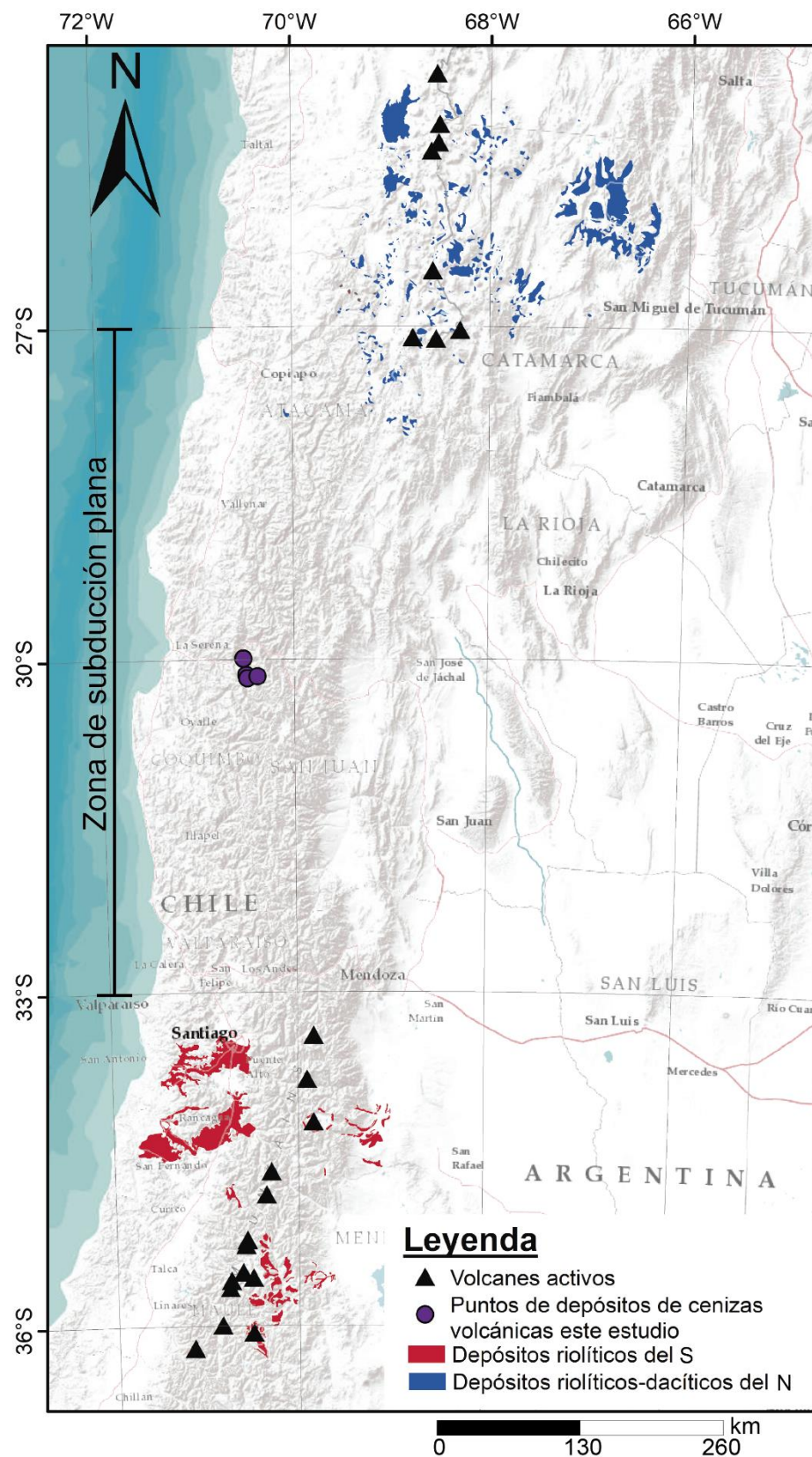
## 1.1 Formulación del problema

Los depósitos piroclásticos de caída se generan debido a las erupciones altamente explosivas a partir de magmas altamente viscosos, con composiciones que pueden variar entre andesíticas y riolíticas. Durante estas erupciones, grandes volúmenes de pómez son eyectados generando extensos depósitos de caída que pueden ser: (i) proximales al centro emisor, que generalmente son homogéneos, de mayor espesor y de granulometría gruesa, y (ii) distales al centro emisor, que disminuyen su granulometría y espesor (Cas & Wright, 1998).

El régimen tectónico en la actualidad se caracteriza por estar inmerso en un segmento de subducción plana (menor ángulo de subducción), cuyo desarrollo provocó la migración del eje del arco volcánico hacia el este, con un posterior cese en el volcanismo (Figura 1) (Pardo *et al.*, 2002).

En la Cordillera Principal de Chile central, entre los 33° - 33°10'S, fueron reconocidos 6 depósitos de cenizas volcánicas en distintos puntos de los ríos Claro y Cochiguás, y las quebradas Paihuano y Tres Cruces. Estos siempre se encuentran bajo una cobertura aluvial, lo que indicaría que son depósitos recientes.

De los antecedentes anteriormente mencionados se desprende que los depósitos son inusuales. En el presente estudio, estos se analizan con el fin de aportar elementos granulométricos, composicionales (geoquímicos y mineralógicos) y estratigráficos que ayuden a la determinación de la proveniencia de estos depósitos.



**Figura 1: Depósitos riolíticos y dacíticos de Chile central. Se incluyen puntos de los depósitos de este trabajo.**

## **1.2 Hipótesis**

La proveniencia de las cenizas volcánicas encontradas en las laderas de los valles del río Claro y Cochiguás, Quebrada Tres Cruces y Quebrada Paihuano estarían asociadas a un evento eruptivo con desarrollo de una pluma de cenizas (como fue el evento eruptivo Caldera El Diamante, siempre y cuando el transporte haya sido condicionado por vientos dominantes hacia el norte).

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

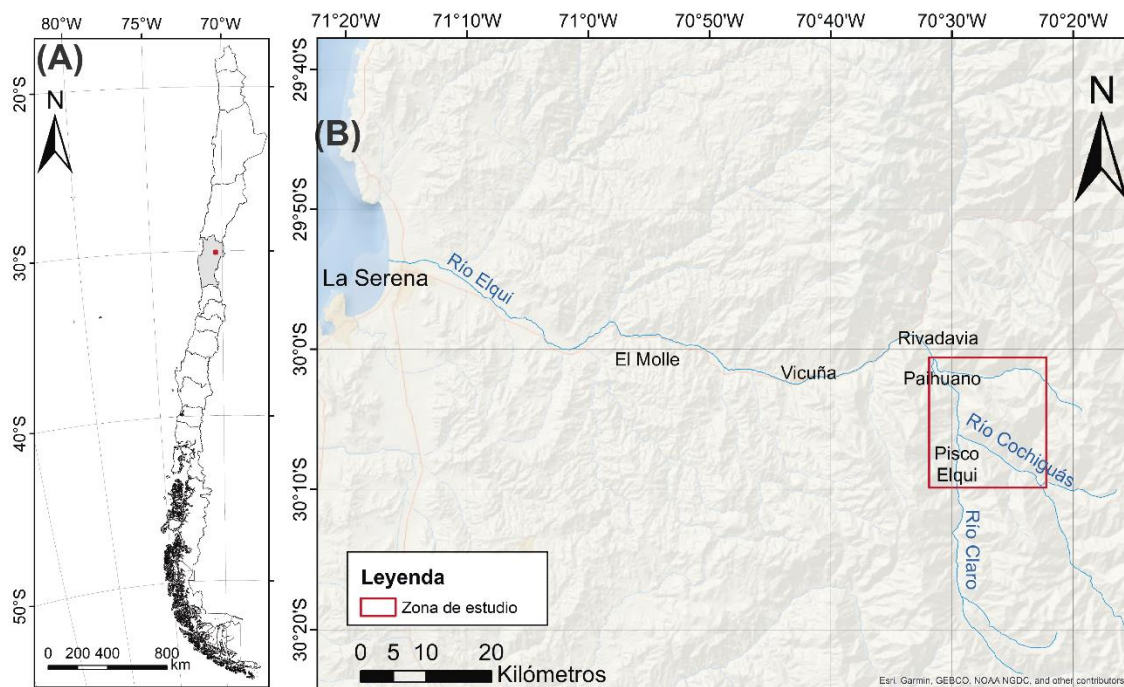
El objetivo principal de este estudio es aportar al entendimiento respecto del origen de los niveles de cenizas volcánicas depositadas en los valles de los ríos Claros y Cochiguás, quebradas Paihuano y Tres Cruces. Mediante la caracterización de sus estructuras de depositación, su mineralogía y la textura de sus granos; con el fin de evaluar las hipótesis que se han planteado en la literatura y otras que se discuten en este trabajo.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

1. Determinar estratigráficamente la exposición, la granulometría y componentes de cada muestra de los depósitos de cenizas volcánicas.
2. Discutir los mecanismos eruptivos.
3. Discutir la naturaleza del magmatismo con respecto al ambiente geotectónico
4. Discutir los procesos de emplazamiento de los piroclastos y removilización.
5. Establecer comparaciones con los depósitos generados por el evento eruptivo Caldera El Diamante y la Zona Volcánica Pocho.

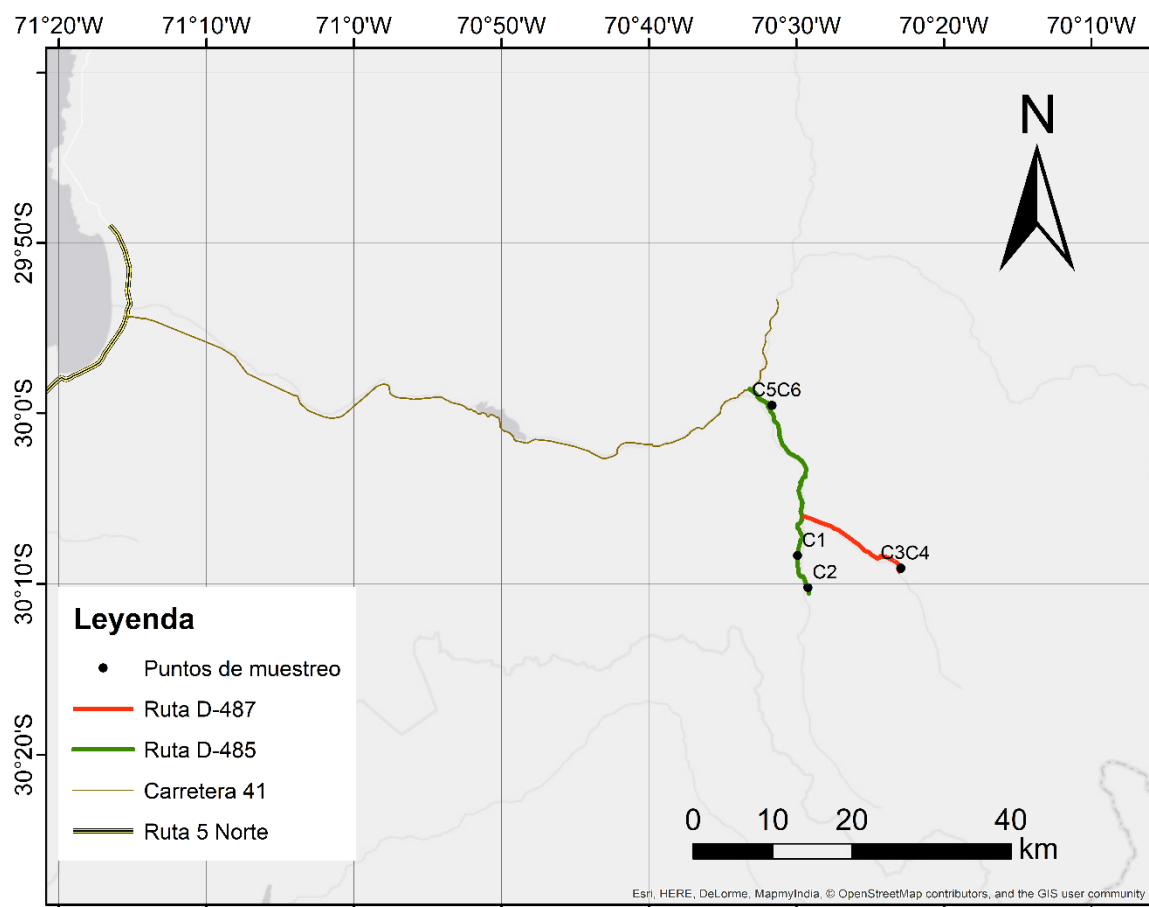
## 1.4 Ubicación y accesos

La zona de estudio se ubica en la Región de Coquimbo, Provincia del Elqui. En los valles de los ríos Claro y Cochiguás, quebradas Paihuano y Tres Cruces (Figura 2).



**Figura 2: Ubicación zona de estudio**

En la Figura 3 se puede observar la principal vía de acceso a la zona de los valles de los ríos Claro y Cochiguás. Se accede a través de la Ruta 5 Norte (pavimentada) a través de la cual se accede a la ciudad de La Serena, ubicada a 472 km al norte de la ciudad de Santiago. Ya en la ciudad de La Serena, se debe desviar desde la Ruta 5 Norte a la Ruta 41, ruta por la cual se llega a la localidad de Paihuano donde se debe tomar el desvío hacia la Ruta D-485, para adentrarse al Valle Río Claro. Para acceder al Valle Cochiguás, se debe tomar la ruta D-487 desde la localidad de Monte Grande.



**Figura 3: Mapa de vías de acceso**

## 1.5 Metodologías

A continuación, se describe la metodología empleada en este estudio tanto en la etapa de terreno como en laboratorio.

Se realizó una salida a terreno de 3 días en los que se visitaron los distintos puntos donde afloran los niveles de cenizas (ver Figura 3). Se confeccionaron columnas estratigráficas de depósitos aluviales, coluviales y niveles de ceniza. Además, se extrajo 1kg de muestra por cada afloramiento (6 muestras en total), correspondientes a cenizas + clastos de depósitos coluviales, en los niveles de ceniza más puros.

### **1.5.1 Granulometría y Componentes**

Para el análisis granulométrico y de componentes de las cenizas, se empleará el procedimiento que se describe a continuación en los Laboratorios de Geología de la Universidad Andrés Bello, Sede República. La clasificación granulométrica, fue realizada mediante dos ensayos de tamizado con tamices de distinto número y abertura, que se disponen uno sobre otro formando una columna de tamices; los de mayor apertura van en la parte superior y los de menor apertura hacia la base. Antes de realizar el ensayo, las muestras fueron secadas a 80°C por 24 horas en un horno, con motivo de extraer la humedad. Los tamices seleccionados fueron: (i) para un ensayo #25, #80, #140, #170, #200 y #230, y para el otro ensayo (ii) #10, #18, #35, #60, #120, #230. Luego de realizar los ensayos granulométricos, las muestras fueron pesadas, guardadas y etiquetadas en bolsas plásticas. Finalmente se generó dos curvas granulométricas de frecuencia acumulada.

Una vez realizado lo anterior, se procedió con la separación de componentes en la que se seleccionaron las fracciones de #80= 180µm y #230= 63µm, depositando el material de las fracciones seleccionadas en seco sobre una placa de vidrio, utilizando una lupa binocular “NIKON SMZ-168 SERIES” con ayuda de una pinza. Se separaron 400 componentes con el fin de generar un análisis porcentual de estos.

### **1.5.2 Mineralogía y Morfología de vidrio volcánico**

La mineralogía de las cenizas se estudió mediante análisis de difracción de rayos x (DRX) en la máquina *BRUKER D8 ADVANCE* a 40kv, 30mA en un ánodo de cobre y detector *LYNX EYE*, y microscopio electrónico de barrido, realizado en el Laboratorio de Análisis de Sólidos (LAS) de la Universidad Andrés Bello, Sede República. Las muestras fueron preparadas de la siguiente manera: 10g de muestra de C1 a C4, fueron agitadas sobre un papel con el fin de extraer los clastos coluviales, mientras que la muestra C5 fue preparada mediante tamizaje, utilizando 10g del material que pasó por la #200 después del tamizaje; luego se traspasó a unas plaquetas las cuales fueron llevadas a una prensa con finalidad de

homogenizar la muestra y eliminar el vacío; para analizar y finalmente evaluar los resultados con el software *DIFFRAC SUITE EVA*. Para verificar los minerales observados durante la separación de componentes y para determinar la morfología del vidrio se utilizó el microscopio electrónico de barrido. Luego del tamizado se utilizó el material que pasó por la #230, en un porta muestra (*pin*), se puso una cinta conductora de doble cara, y el material fue puesto en una placa de vidrio para ser levemente aplastado por el porta muestras.

Para la mineralogía el análisis correspondió a Espectroscopía Dispersiva de Energía (EDE, EDS siglas en inglés). Para lograr observar la morfología del vidrio se utilizaron imágenes obtenidas por Electrones Secundarios (ES).

## 2. Antecedentes geológicos

En este capítulo, se incluye una caracterización de los principales rasgos morfoestructurales regionales, el marco geotectónico desde el Jurásico entre los 28° y 32°S y el marco geológico local de la zona de estudio.

### 2.1 Rasgos morfoestructurales regionales

Desde el Jurásico Inferior hasta el presente, el régimen de subducción ha estado ininterrumpidamente activo en el margen oeste de Sudamérica (Charrier *et al.*, 2007), ejerciendo un rol fundamental en la evolución tectónica y magmática de los Andes (Coira *et al.*, 1982).

Baranzangi e Isacks en 1976, reconocieron la presencia de un segmento de subducción de bajo ángulo (subhorizontal) entre 27°S y 33°30' S (Figura 1), conocido como zona de subducción plana (o *flat-slab*), o segmento Pampeano de subducción plana (Ramos *et al.*, 2002). Este se caracteriza por la escasez de actividad volcánica reciente, ausencia de los valles longitudinales y el desarrollo de valles fluviales transversales (Farías, 2007).

Debido a la ausencia de la Depresión Central, las unidades morfoestructurales de la zona de estudio en el segmento de subducción plana pueden ser divididas en: Cordillera de la Costa y Cordillera Principal (Charrier *et al.*, 2007), la última de estas puede ser dividida en dos subunidades: Cordillera Principal Oriental y Cordillera Principal Occidental (Aguilar *et al.*, 2013).

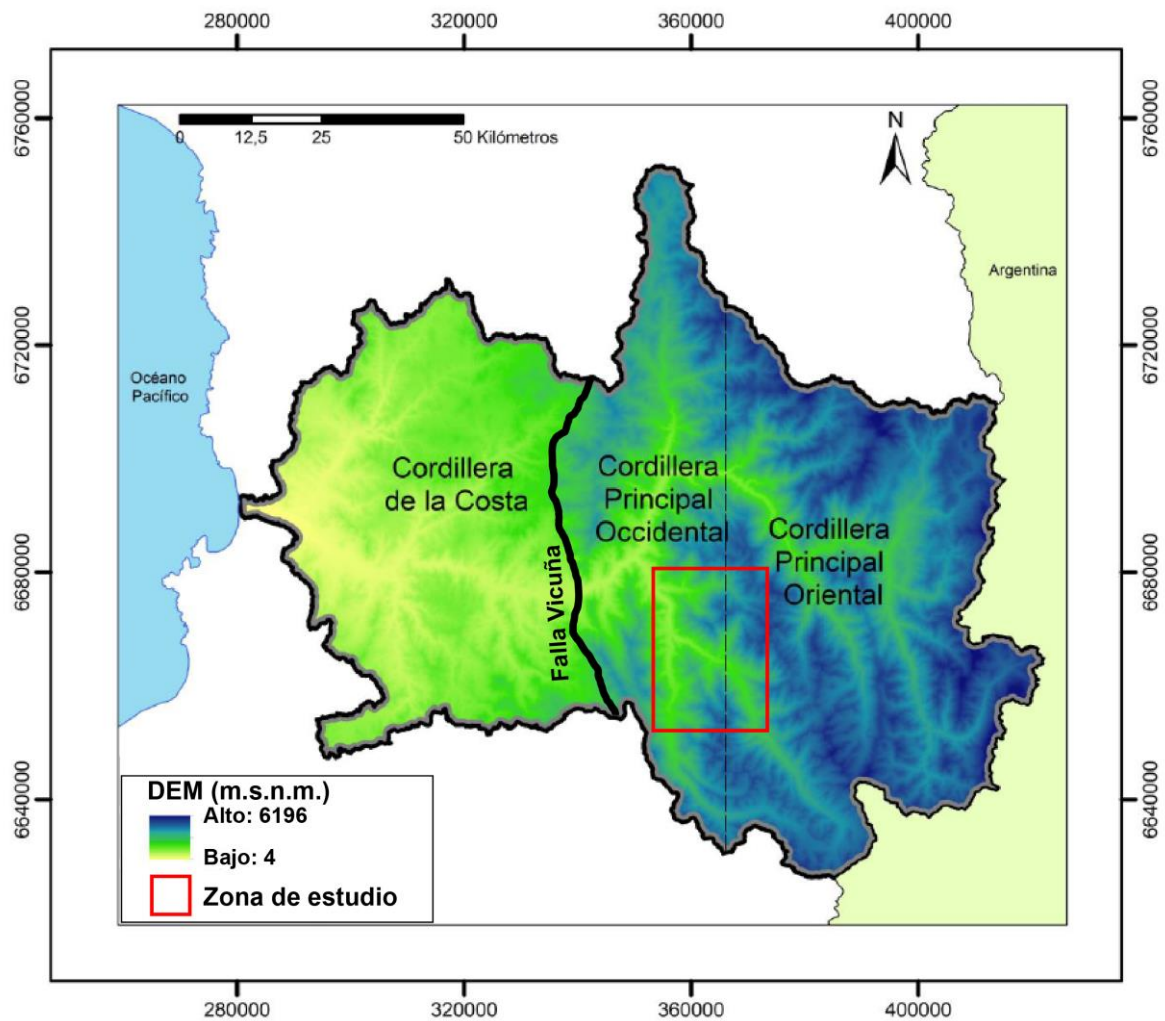
Aguilar *et al.* (2013) establece que la Cordillera de la Costa se caracteriza por ser un paisaje maduro con cumbres convexas de altitudes de hasta 2.000 m.s.n.m. Los espolones que nacen de estas cumbres dan paso, aguas abajo, a pedimentos que en sus partes más distales definen superficies planas con una ondulación dada por la coalescencia de abanicos aluviales. Los pedimentos relacionados a las cuencas del Elqui y Choapa son menos extensos a los asociados a las cuencas del Copiapo y Huasco, esto evidencia una mayor degradación del relieve de pedimentos en las cuencas del Elqui y Choapa, dado por la densificación e incisión de la red de



drenaje. El relieve de la cuenca del Elqui es el resultado de un mayor desarrollo de sierras en relación a las del norte, las que descienden como laderas cóncavas hacia amplias superficies formadas por lechos aluviales. Una explicación posible para la mayor incisión de la red de drenaje en esta cuenca es la presencia del acortamiento de la línea de costa que permite una mayor influencia del ambiente costero hacia el continente, que resulta en un clima relativamente más húmedo y en un relieve más susceptible a la incisión como resultado de cambios del nivel base del océano.

Según Aguilar *et al.* (2013), la Cordillera Principal preserva en sus interfluvios más altos superficies planas con rasgos definitorios de un pedimento que alcanzan altitudes de hasta 5.000 m.s.n.m., y descienden gradualmente hacia el oeste hasta 4.000 m.s.n.m. El rasgo geomorfológico principal de la Cordillera Principal Occidental es la presencia de cañones que representan hasta 2.000 m de incisión y que dan paso, aguas arriba, a empinadas paredes. Los altos valores de las pendientes se concentran en los cañones, mientras que los interfluvios planos están dominados por pedimentos de baja pendiente. En la cuenca del Elqui las pendientes de las cuencas tributarias se mantienen constantes hacia el este, lo que indica que la incisión fluvial ha alcanzado hasta las altas cumbres. En la Cordillera Principal Oriental, por su parte, se exponen las altitudes mayores de la cordillera, con una geomorfología modelada por la erosión fluvial y glacial. Así los glaciares habrían aprovechado los valles fluviales, dándoles la clásica forma de artesas en U, para ser modelados posteriormente por corrientes fluviales, adquiriendo en algunas partes, formas en V.

Cabe destacar que ambas unidades morfoestructurales están limitadas por la falla Vicuña (Mpodozis y Cornejo, 1998) (Figura 4).



**Figura 4: Modelo de elevación digital con divisiones esquemáticas en 2 unidades morfoestructurales principales separadas por la zona de falla Vicuña: Cordillera de la Costa y Cordillera Principal, ésta última dividida en dos subunidades: Occidental y Oriental. En el cuadro rojo se presenta la zona de estudio (modificado de Gómez, 2015).**

## 2.2 Marco geotectónico en la Región de Coquimbo

En el Jurásico Inferior se reactivó el régimen de subducción dando inicio a una serie de condiciones mecánicas y termales que caracterizan la evolución tectonoestratigráfica del margen andino. Esto se conoce como Ciclo Andino, el cual se separa en tres etapas interrumpidas por distintas fases de deformación compresivas, expuestas como orogénias en la Tabla 1 (Charrier *et al.*, 2007).

**Tabla 1: Etapas y subetapas del ciclo andino, con sus eventos tectónicos característicos (extraído de Charrier *et al.*, 2009)**

| EDAD | ERA       | PERIODO   | CICLO TECTONICO            | ETAPAS  | SUBETAPAS | EVENTOS TECTONICOS   |
|------|-----------|-----------|----------------------------|---------|-----------|--|
| 10   | CENOZOICO | NEOGENO   | A<br>N<br>D<br>I<br>N<br>O | Tercera | Segunda   | <i>Orogenia Pehuenche</i>  |
|      |           |           |                            |         | Primera   |  |
| 50   |           | PALEOGENO |                            | Segunda | Segunda   | <i>Orogenia Incaica</i>  |
|      |           |           |                            |         | Primera   | <i>Orogenia K-T</i>  |
| 100  | MESOZOICO | CRETACICO |                            | Primera | Segunda   | <i>Orogenia Peruana</i>  |
|      |           |           |                            |         |           | Extensión<br><i>Subsidencia termal</i>   |
| 150  |           | JURASICO  |                            |         | Primera   | Extensión<br><i>Subsidencia tectónica</i>  |
| 200  |           |           |                            |         |           | Emersión de la cuenca<br><i>Subsidencia termal</i><br><i>Subsidencia tectónica</i> |

### 2.2.1 Evolución tectónica del Jurásico-Paleógeno

En la primera etapa del Ciclo Andino, se desarrolló un arco magmático con orientación norte-sur ubicado en lo que es hoy, la actual Cordillera de la Costa, además de una cuenca de trasarco marina al este del arco. Entre los 28°30' y 29°00'S se habrían desarrollado una serie de hemigraben con apertura hacia el oeste controlada por fallas normales entre el Triásico y el Cretácico Inferior (Salazar, 2012). El bajo acoplamiento entre las placas oceánica y continental explicaría la condición extensional que caracteriza a esta etapa, permitiendo a una actividad magmática intensa y abundante sedimentación en la cuenca de tras arco (Charrier *et al.*, 2007). Posterior a esto, se invierte la cuenca de tras arco (Mourgues, 2007) causado por una fase de deformación compresiva conocida como Fase Peruana (Charrier y Vicente, 1972; Vicente *et al.*, 1973; Reutter, 2001), ocurrido entre el Cretácico Inferior y Cretácico Superior, este evento deforma, alza y eroda las unidades sedimentarias (Steinmann, 1929; Groeber, 1951; Charrier y Vicente, 1972; Vicente *et al.*, 1973; Reutter, 2001). Esta fase cambia sustancialmente la paleogeografía del margen continental, el arco magmático se desplaza hacia el este, las cuencas de tras arco dan a lugar a cuencas continentales de antepaís (hacia el este del arco), y se genera una amplia región de ante arco (hacia el oeste del arco) (Charrier *et al.*, 2009).

Hacia fines del Cretácico Temprano, con la separación entre Sudamérica y África se inicia la deformación contraccional, asociada a la fase compresiva K-T (Cornejo *et al.*, 2003; Charrier *et al.*, 2007). Esta fase de deformación es evidenciada por la inversión tectónica de las cuencas extensionales por medio de la reactivación inversa de fallas de borde y por el transporte tectónico hacia el oeste que habría inducido el alzamiento relativo de la Cordillera Frontal por sobre la Cordillera de la Costa (Salazar, 2012). Paralelamente, se acumulan potentes secuencias volcánicas en la Cordillera de la Costa y se acuñan hacia el este contra el frente de de la Cordillera Frontal. De forma sincrónica, una gran cantidad de rocas intrusivas, agrupadas en distintos complejos plutónicos, representan el plutonismo en este periodo (Cornejo *et al.*, 2003; Maksaev *et al.*, 2009; Martínez *et al.*, 2013).

Luego, ocurrió un periodo de extensión-transtensión, que se prolongó hasta el Eoceno Medio (Charrier *et al.*, 2009). Este último periodo post K-T, se reconoce como la segunda sub-etapa de la segunda etapa del Ciclo Andino. Este régimen tectónico condiciona una subducción oblicua de la placa Farallón por debajo de la placa Sudamericana, en la que sus tasas de convergencia eran relativamente bajas (Pardo-Casas y Molnar, 1987). No obstante, durante el Eoceno Medio a Eoceno Tardío, cambian las condiciones tectónicas, la subducción se torna menos oblicua y las tasas de convergencia aumentan (Pilger, 1984; Pardo-Casas y Molnar, 1987; Somoza, 1998; Reutter, 2001), lo que generaría la fase compresiva Incaica, iniciando la tercera etapa del Ciclo Andino (Steinmann, 1929; Charrier y Vicente, 1972; Cornejo *et al.*, 2003; Reutter, 2001; Charrier *et al.*, 2007). Esta fase provocaría un relieve positivo de orientación NNE-SSW generado por la inversión, el alzamiento del arco y de las cuencas extensionales mesozoicas asociadas (Charrier *et al.*, 2007), generándose fallas tipo “*short-cut*” y “*bypass*” en el frente de montaña de la Cordillera Frontal, que cortan a las fallas normales del mesozoico (Salazar, 2012). El relieve positivo formado, denominado como Relieve Incaico (Charrier *et al.*, 2007, 2009), comprende a las sucesiones mesozoicas deformadas e intrusivos del Cretácico Superior al Paleoceno Inferior exhumados.

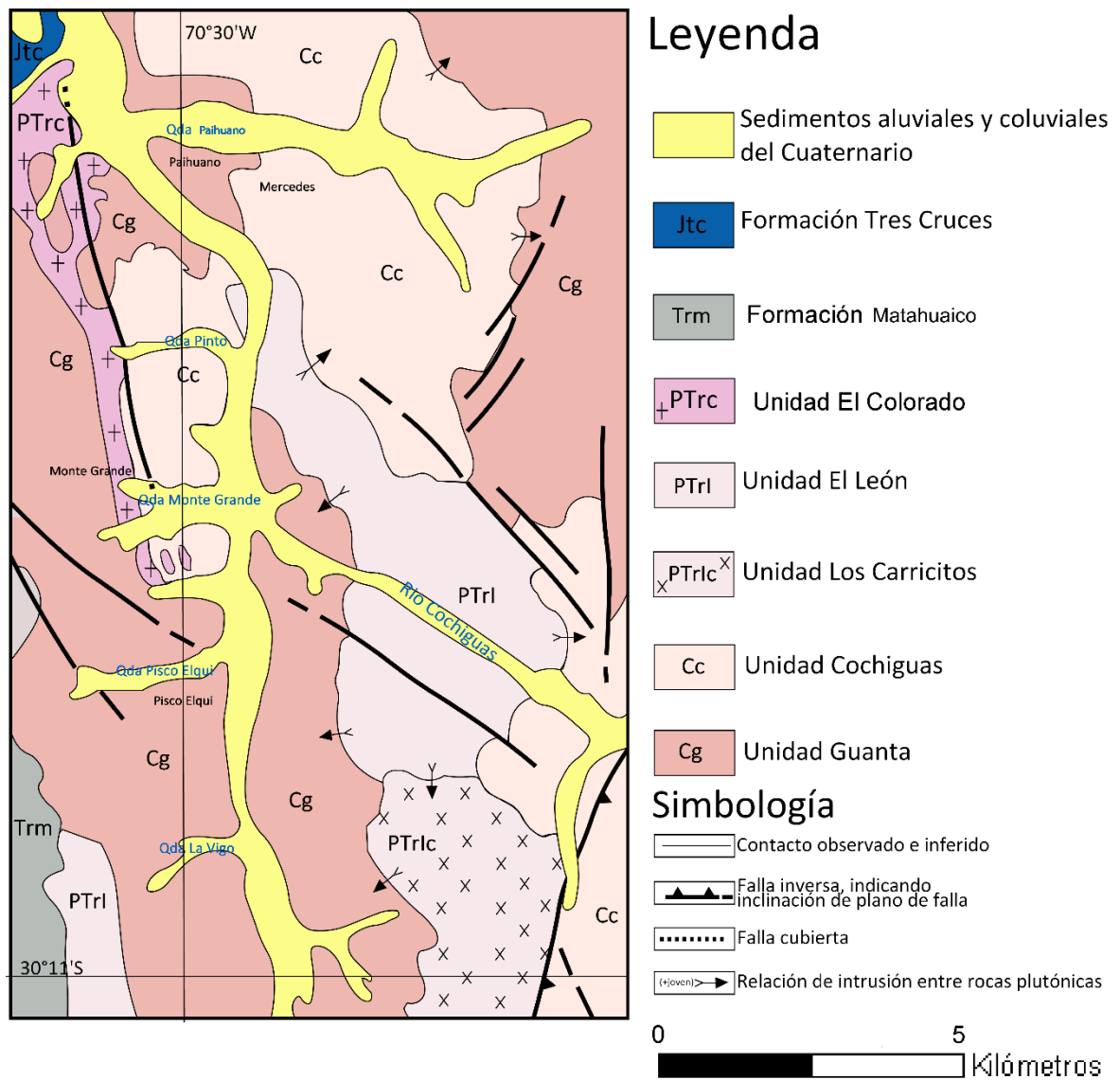
### **2.2.2 Evolución tectónica del Neógeno**

En el límite Oligoceno-Mioceno, ocurre un evento de deformación compresivo, la Orogenia Pehuenche (Yrigoyen, 1993). A esta orogenia se le atribuye el inicio del alzamiento de la Cordillera Frontal con respecto a la Cordillera de la Costa (Cembrano *et al.*, 2003; Charrier *et al.*, 2005) en los Andes Semiáridos, los cuales están ubicados entre 27°-32°S, acomodado probablemente por la actividad del Sistema de Fallas Vicuña-San Félix (Aguilar *et al.*, 2013). Este alzamiento puede asociarse con un incremento en la tasa de convergencia de placas cercano a los 25 Ma (Somoza, 1998), producto de la separación de la Placa Farallón en las placas de Nazca y Cocos. Además de esto, en la zona ubicada entre 26° y 27°S, la reactivación del Sistema de Fallas de Atacama (SFA) durante el Mioceno, alzó el flanco occidental de la Cordillera de la Costa (Riquelme *et al.*, 2003), bloqueando el

paso de los sedimentos provenientes de la erosión de la Cordillera Incaica (Charrier *et al.*, 2007). Por esta razón hacia el este de SFA, se depositaron espesores considerables de clastos no consolidados, tales como son la Formación Altos de Pica o las Gravas de Atacama (Charrier *et al.*, 2007). Durante el Mioceno Inferior, a los 20 Ma, ocurre la colisión de la Dorsal de Juan Fernández con el continente alcanzando la posición actual desde hace 10 Ma (Yáñez *et al.*, 2001), esto habría generado la zona de *flat-slab* entre los 27° y 33°S (Barazangi e Isacks, 1976) (Figura 1). Lo anterior repercute en la disminución del ángulo de subducción, generando que el arco migre hacia el este, haya un cese del volcanismo y una ausencia de depresión intermedia (Pardo *et al.*, 2002). Según Charrier *et al.*, 2009, durante el Mioceno Superior, habría comenzado el proceso que formaría la topografía actual de los Andes con la incisión generada por los ríos provenientes de la cordillera, formando los valles actuales que atraviesan el ante arco (Aguilar *et al.*, 2011, 2013).

### **2.3 Marco geológico local**

El mapa geológico acotado a la zona de estudio (Figura 5) muestra las unidades litológicas según la Carta Geológica de Chile No. 68, correspondiente a la Hoja Pisco Elqui, Servicio Nacional de Geología y Minería, escrita por Mpodozis y Cornejo (1988).



**Figura 5: Mapa geológico local de la zona de estudio, modificado de la Hoja Pisco Elqui (Mpodozis y Cornejo, 1988), Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile.**

### 2.3.1 Basamento

La geología del área comprende de un basamento correspondiente a un complejo plutónico denominado como Batolito Elqui-Limarí, constituido por múltiples intrusiones, que pueden ser agrupadas en dos superunidades mayores (Mpodozis y Cornejo, 1988): La Superunidad Elqui y la Superunidad Ingaguás.

#### 2.3.1.1 Superunidad Elqui (SUE)

Agrupar a un conjunto de plutones carboníferos (Mpodozis y Cornejo, 1988) de grandes dimensiones (decenas de km<sup>2</sup>) que constituyen la parte oeste del Batolito Elqui-Limarí (Nasi *et al.*, 1985). Las unidades presentes en la zona de estudio corresponden a la Unidad Guanta y la Unidad Cochiguás. Nuevas edades radiométricas de U-Pb en circonio son presentados en Hervé *et al.* (2014).

##### 2.3.1.1.1 Unidad Guanta

La Unidad Guanta de edad carbonífera (Nasi *et al.*, 1985) forma el borde occidental del Batolito Elqui-Limarí, es una asociación que comprende tonalitas y granodioritas de hornblenda-biotita (y algunas variedades de dioritas cuarcíferas y gabros de hornblenda) de grano grueso, con abundantes xenolitos microdioríticos (Mpodozis y Cornejo, 1988). El nombre de esta Unidad proviene del poblado de Guanta, en el valle del río Turbio, una localidad ubicada en el eje del mayor de los plutones que pertenecen a esta unidad, el cual se llama Plutón Guanta (Nasi *et al.*, 1985).

En los comienzos de la Quebrada Paihuano y Quebrada El Pangue (Río Cochiguás) la existencia de inclusiones microdioríticas en el Plutón Guanta son tan grandes, que las rocas pueden ser descritas como migmatitas (Mpodozis y Cornejo, 1988).



#### 2.3.1.1.2 Unidad Cochiguás

La Unidad Cochiguás de edad carbonífera (Ribba, 1985) agrupa un conjunto de plutones leucocráticos, de dos micas (biotita  $\pm$  muscovita), que se concentran en la zona central y occidental del BEL. El nombre proviene del río Cochiguás, en el que en su curso inferior aparece expuesto el mayor de los plutones de esta unidad, el Plutón Cochiguás (Mpodozis y Cornejo, 1988). La unidad similar a la “Asociación de Granodioritas con muscovita” (Mpodozis *et al.*, 1976) muestra un contacto gradual e incluso intruye a la Unidad Guanta. Al sur del río Turbio, está representada por granitoides de grano medio a grueso y color gris a blanco, que pueden contener zonas pegmatíticas con muscovita, estos son los plutones Chapilca, Molino Yaco y Cochiguás. Los plutones presentes en la zona que abarca el río Claro, están atravesados por enjambres de diques básicos, subverticales, de rumbo NNW (Mpodozis y Cornejo, 1988).

En varios plutones de la Unidad Cochiguás, se pueden encontrar zonas con venas pegmatíticas de muscovita (Mpodozis y Cornejo, 1988).

#### 2.3.1.2 Superunidad Ingaguás (SUI)

La Superunidad Ingaguás es una asociación de plutones Permo-Triásicos (Mpodozis y Cornejo, 1988), en general hololeucocráticos, que pueden encontrarse intruyendo o dispuestos al este de los afloramientos de la Superunidad Elqui. Las unidades presentes en la zona de estudio comprenden a la Unidad Los Carricitos, Unidad El León y Unidad El Colorado.

##### 2.3.1.2.1 Unidad Los Carricitos

La Unidad Los Carricitos según Nasi *et al.* (1985), es un conjunto de granodioritas de biotita. Según Mpodozis y Cornejo, 1988, la Unidad Los Carricitos está formada por granitoides de grano medio y color gris claro de edad pérmica a triásica media. Que, comparándose con los intrusivos de la SUE, presentan un aspecto “fresco”. El área de estudio está representado por el Plutón Carrizal, que está intruido por los granitos y pórfidos de las Unidades El León y El Colorado.

#### *2.3.1.2.2 Unidad El León*

En la zona centro-este del BEL, se pueden encontrar cuerpos de monzogranitos y sienogranitos leucocráticos rosados de grano medio de edad pérmica a triásica media. El más representativo de estos cuerpos es el Plutón El León, está ubicado entre los ríos Ingaguás y Claro, formado por rocas leucocráticas que poseen cavidades miarolíticas, que indican emplazamiento epizonal (Mpodozis y Cornejo, 1988). Intruyen a las Unidades Guanta y Cochiguás.

#### *2.3.1.2.3 Unidad El Colorado*

Según las relaciones de contacto, La Unidad El Colorado es la más joven de la Superunidad Ingaguás. Su nombre proviene del Plutón El Colorado, en el valle del río Turbio (Nasi *et al.*, 1985). En la zona de estudio esta unidad está representada por el Plutón Dolores, de forma tabular, ubicado al oeste de Paihuano, emplazado a lo largo del contacto entre la Unidad Cochiguás y Unidad Guanta. Esta unidad está constituida por monzogranitos y sienogranitos gráficos, de grano grueso, con cavidades miarolíticas, hasta granitos gráficos de grano fino y pórfidos riolíticos con ojos de cuarzo (Mpodozis y Cornejo, 1988).

### **2.3.2 Formaciones Volcánicas del Paleozoico Superior – Triásico Inferior**

#### **2.3.2.1 Formación Matahuaico**

Esta formación está definida por Dedios (1967), forma una delgada franja al oeste del río Claro. La secuencia de lavas, tobas y brechas riolíticas, que junto a intercalaciones sedimentarias, posee espesores variables entre 100 y 500 m, y aparece intruida por pórfidos graníticos y granitos de la SUI.

### **2.3.3 Formaciones Marinas Jurásico Inferior-Medio**

#### **2.3.3.1 Formación Tres Cruces**

El nombre Formación Tres Cruces fue utilizado por primera vez por Dedios (1967) para tomar referencia a los afloramientos del Jurásico marino, que se encuentran en el Cuadrángulo Vicuña. Los afloramientos de esta formación aparecen como pequeños “parches” apoyados sobre el BEL (Mpodozis y Cornejo, 1988).

En el valle del río Claro, los espesores de esta formación son muy variables. Según Dedios (1967) y Letelier (1977), está constituida por conglomerados y areniscas cuarcíferas blancas con clastos redondeados de cuarzo lechoso policristalino, granitoides y riolitas e intercalaciones de niveles calcáreos fosilíferos (biomicritas, dismicritas extraclásticas, coquinas). Además, se han recolectado amonoídeos que señalarían la presencia de los pisos Sinemuriano, Pliensbachiano y Toarciano (Tavera en Letelier, 1977; Pérez en Dedios, 1967).

#### **2.3.4 Marco Glaciológico**

Los depósitos no consolidados no están bien estudiados en la zona de estudio, sin embargo, hay estudios de los depósitos glaciares aguas arriba del Río Turbio, siendo estos morrenas laterales y frontales.

Riquelme *et al.* (2011), obtuvieron edades para depósitos de morrena lateral y frontal aguas arriba del Río Turbio, cercano a La Laguna, con rangos entre 37 – 27 ka y 17 – 12 respectivamente. Esto indicaría que, entre esas edades, hacia la alta cordillera, había una cobertura glacial importante, registrada por el valle en U que es posible observar en la actualidad. Sin embargo, aguas abajo debido al deshielo, la morfología estaría relacionada a procesos fluviales y pluviales, quedando como registro los valles en V, con vestigios de depósitos detríticos de material glacial. Caviedes & Paskoff (1975) estudiaron las glaciaciones en los Andes semi-áridos de la zona norte-centro de Chile. En los valles de los ríos Turbio, Claro, Cochiguás y en la junta entre estos dos últimos, llegaron a la conclusión de que el clima estuvo

caracterizado por una baja en la temperatura promedio y por un incremento en la precipitación, lo que condujo a condiciones morfoclimáticas pluviales. Además, el bajo relieve preexistente en la zona no permitió la acumulación nieve y hielo de manera permanente. Consecuente a esto, la alta pendiente y la meteorización de las rocas debido a la ablación glaciaria, favorecieron la ocurrencia de procesos torrenciales, provocados por el efecto represa que lograban las acumulaciones de detritos gruesos, culminando en depósitos aluviales, los cuales corresponden a la cobertura actual de los valles estudiados.

## 3.Marco Teórico

### 3.1 Grandes erupciones (explosivas)

Las grandes erupciones requieren un gran volumen de magma con potencial fuertemente explosivo. El potencial explosivo resulta del contenido de volátiles constituyentes (mayoritariamente H<sub>2</sub>O) que pueden generar burbujas de gas, combinado con alta viscosidad para inhibir el escape de las burbujas desde el fundido; es el exceso de esas burbujas atrapadas las que producen una explosión (Miller *et al.*, 2008).

Las erupciones explosivas, de tamaños grandes o “normales”, podrían ser gatilladas por una perturbación que lleva a un crecimiento extensivo de burbujas o a un fallamiento y fracturamiento de la roca contenedora que rodea y se superpone a la cámara magmática, produce conductos a la superficie. La expansión del magma ya sea a través del crecimiento de burbujas o a través de la adición de un nuevo magma, incrementa la presión, y si esta sobrepresión excede la resistencia de la roca circundante, la roca contenedora se fallaría y se inyectaría magma en las fracturas resultantes, potencialmente alcanzando la superficie y erupcionando. Esto resulta de una rápida disminución de la presión en el magma, causando un crecimiento de burbujas y que exploten (Miller *et al.*, 2008). Posibles gatillantes para las erupciones explosivas (Anderson, 1976; Pallister *et al.*, 1992; Eichelberger e Izbekov, 2000; Bachman y Bergantz, 2003, 2008; Walter y Amelung, 2007; Davis *et al.*, 1992):

- 1) Saturación de gas en magmas que están cristalizando (los volátiles están particionados en el líquido remanente).
- 2) Reaprovisionamiento por *fresh drafts* de magma.
- 3) Escape del gas, en un magma pobre en cristales desde *mush* de cristales y almacenamiento de este magma de baja densidad y baja fuerza debajo del techo de la cámara.

- 4) Terremotos y fallamientos, que fracturarían las paredes de la cámara o desestabilizaría el mush estancado.

### **3.2 Ceniza volcánica**

El término ceniza volcánica toma en cuenta a toda partícula eyectada por un volcán con un diámetro  $\leq 2\text{mm}$ , sin importar su composición. Se forman cuando el magma se fragmenta durante erupciones explosivas. En volcanología el término “explosivo” se refiere a una conversión de la energía potencial de la mezcla en expansión a la energía cinética de la fase gaseosa y piroclastos, la mayor parte de la energía es disipada como calor, el cual lleva a la expansión de la mezcla gas-partícula (Cashman y Rust, 2016). La fragmentación transforma el magma desde una fase líquida continua con burbujas de gas dispersas (+/- sólidos cristalinos) a una fase gaseosa con fragmentos de magmas dispersos (Cashman y Scheu, 2015). En erupciones magmáticas, el ascenso del magma, su expansión y su fragmentación son controladas primariamente por el contenido de volátiles, que químicamente están disueltos en el magma a altas presiones, pero forman una fase gaseosa que se separa cuando son exseltas a bajas presiones (por ejemplo:  $\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{CO}_2$ ).

### **3.3 Estilos de erupción**

#### **3.3.1 Efusivas y explosivas**

El control en como erupcionan los magmas viscosos y silícicos, está relacionado en cómo se comporta el constituyente volátil (Bachmann y Bergantz, 2008) disuelto en el magma previo y durante la erupción. Si el contenido de volátiles es bajo o la descompresión es suficientemente lenta para que los gases escapen, entonces ocurre una erupción efusiva, formando un domo de lava o flujo de lava (Figura 6A).

Si los gases no pueden escapar fácilmente a medida que el magma sufre descompresión, el crecimiento de las burbujas se esponja y torna al magma en una erupción piroclástica (explosiva). Cualquier adición de agua cercano o en la

superficie de la tierra incrementa la energía de la actividad explosiva, así como el agua se evapora por el calor del magma. Este tipo de erupciones domina los depósitos de los supervolcanes (Wilson C., 2008).

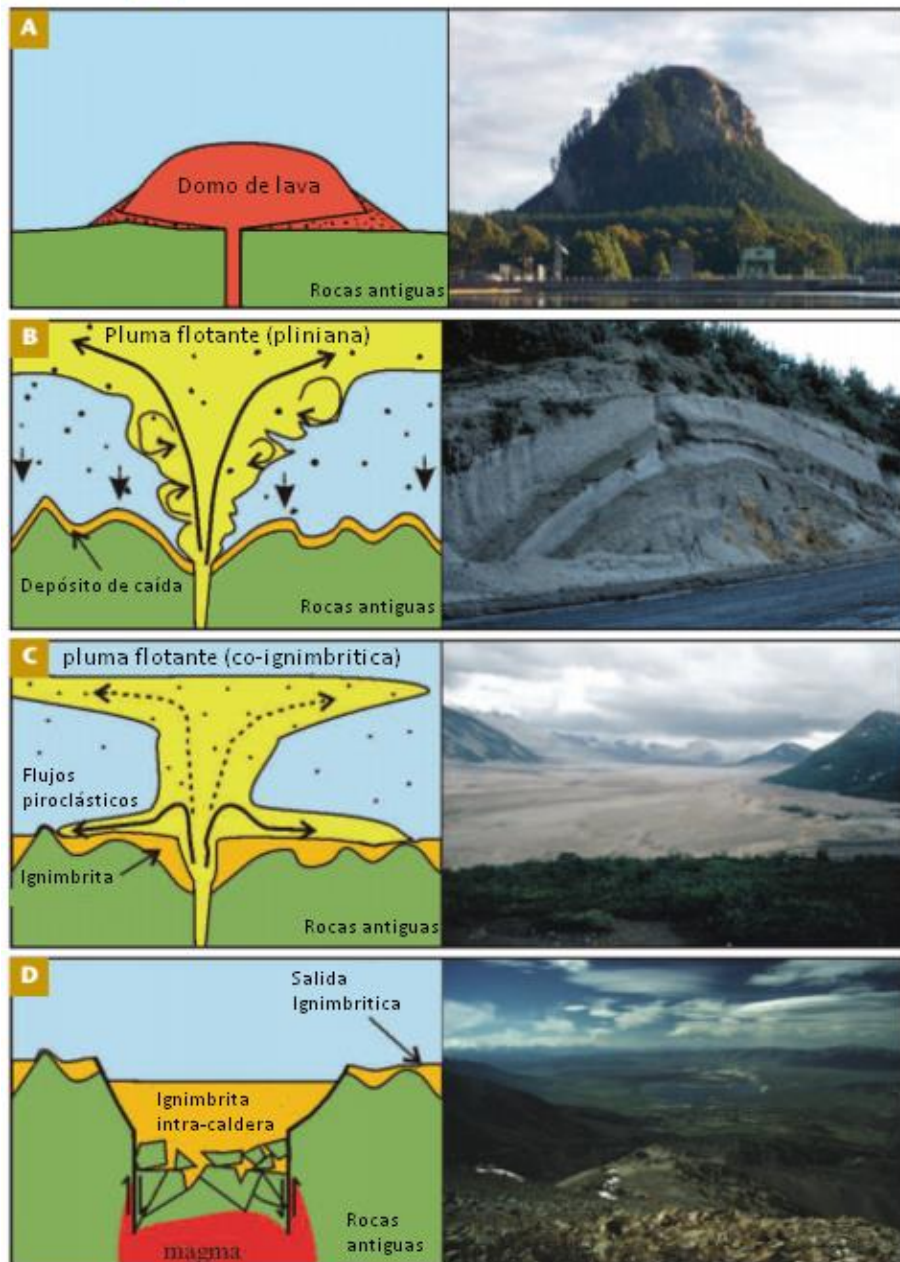
### **3.3.2 Estilos de erupciones explosivas: caída y flujo**

Durante erupciones explosivas, una mezcla entre magma fragmentado y gases salen del centro emisor a velocidades superiores a 600 m/s (>2000 km/h). Cuando pasa esto depende en cómo se comportará la mezcla al llegar a la atmosfera y como se mezclará y calentará el aire, y su rapidez disminuirá (Sparks *et al.*, 1997). Si la cantidad de aire que se incorpora en la mezcla eruptiva es suficiente, se vuelve positivamente flotante con respecto a la atmosfera que lo rodea y se eleva como un balón de aire caliente hasta alturas donde se vuelve neutralmente flotante (buoyante) y se dispersa hacia los lados como una pluma atmosférica. Fragmentos caerán desde la pluma cubriendo la superficie, formando depósitos de caída (Figura 6B). Hasta pequeñas plumas han sido capaces de alcanzar la tropopausa (10-17 km), mientras que las plumas más grandes han alcanzado alturas de 45 km, estas plumas “poderosas” depositan material sobre miles de kilómetros cuadrados e incluso más, para formar lo que se llama un depósito de caída pliniana (Wilson C., 2008).

En contraste con lo anterior, si el impulso ascendente se pierde antes de que la pluma se torne flotante, entonces colapsará. Material de esta fuente será forzado hacia afuera, hacia la superficie del suelo por el gradiente de presión alrededor del centro emisor para formar un flujo piroclástico lateral (Figura 6C). Modelos teóricos de erupciones explosivas tratan a las plumas como un proceso flotante o no flotante, Wilson (2008) reconoció que las plumas flotantes a altas alturas, como son las que generan depósitos de caída plinianos, pueden ocurrir en simultáneo con grandes flujos piroclásticos. Por lo que, flujos piroclásticos están siempre acompañados por una pluma flotante (co-ignimbrítica) que genera depósitos de caída coetáneamente (Figura 6C).

Las calderas son una parte integral de los supervolcanes y sus erupciones (Lipman, 1997; Miller and Wark 2008). La sincronización en que colapsan las calderas durante una erupción genera un cambio de un simple centro emisor (los que favorecen plumas buoyantes y depósitos de caída pliniana) a múltiples a lo largo del anillo de fractura (favoreciendo los flujos piroclásticos; Hildreth y Mahood, 1986). Adicionalmente, la cuenca generada por el colapso proporciona una trampa para productos eruptivos posteriores (Figura 6D; Wilson, 2008).



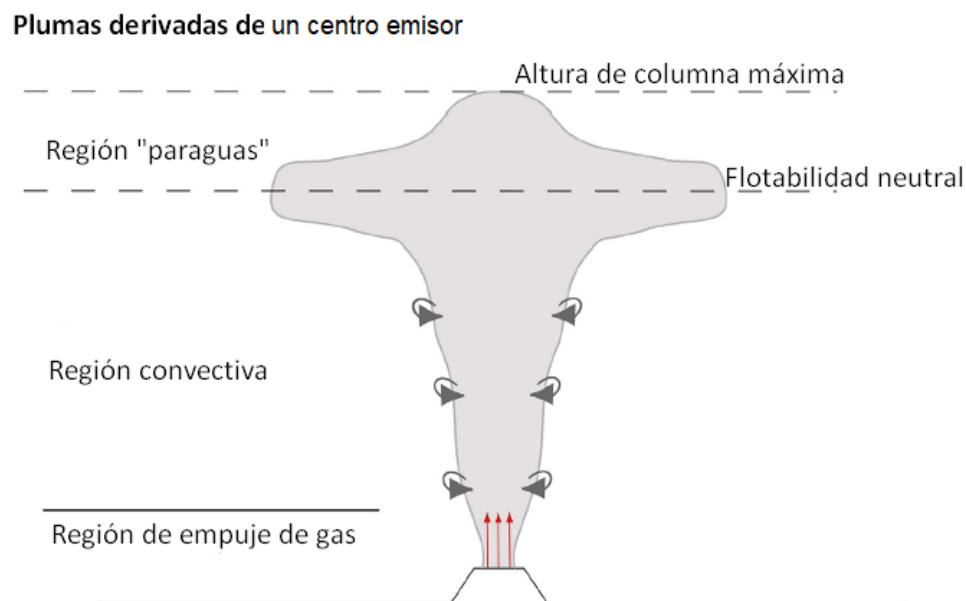


**Figura 6:** Extraído y modificado de Wilson C. 2008. Esquemas de los estilos mayores de erupción volcánica. A) Actividad efusiva produciendo un domo de lava (Pohaturoa, Nueva Zelanda), edificio volcánico pareciera estar erodado. B) Actividad de caída de una pluma flotante (1.8 ka erupción Taupo, Nueva Zelanda). C) Flujo piroclástico, con una pluma como fuente (acompañado por una pluma secundaria rica en ceniza fina; Valle de los Diez mil Humos, Alaska). D) Colapso de la roca caja dentro de una cámara magmática vacía durante o después de la erupción de una caldera, expresado en la topografía por una depresión (0.76 Ma erupción Long Valley, California).

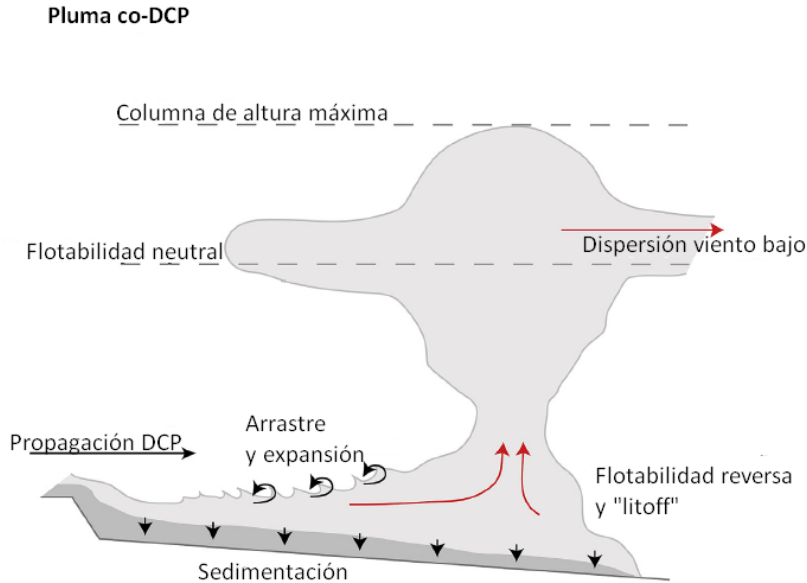
### 3.4 Transporte de las cenizas en la atmósfera

La inyección y dispersión de cenizas en la atmósfera durante erupciones explosivas es principalmente asociada con la formación de columnas convectivas buoyantes sobre centros emisores volcánicos. En este contexto, una mezcla de partículas y gas es eyectado a través del conducto a altas velocidades con una fragmentación del magma al ascender desde las profundidades del conducto volcánico (Figura 7) (Engwell & Eychenne, 2016).

Las plumas derivadas de centros emisores son emitidas desde una fuente que corresponde a la parte superior de un conducto y puede ser separada en 3 regiones. La región de empuje de gas corresponde a los primeros cientos de metros sobre el centro emisor donde la pluma puede describirse como una fase *jet* debido a las altas velocidades, y su alta densidad en comparación con los demás ambientes. Una vez desde la fase *jet* se eleva, es arrastrada, calentada y se expande, resultando en una reducción de la densidad relativo a la atmósfera, y la mezcla se eleva convectivamente a la región convectiva. La región “paraguas”, limita la altura en que la pluma se separa lateralmente en la atmósfera, y es ahí donde ocurre la dispersión.



**Figura 7: Pluma derivada de un centro emisor.**



**Figura 8: Pluma con densidad de corriente co-piroclástica.**

Las plumas convectivas también pueden formar corrientes de densidad piroclástica, estas son mezclas de gas, partículas y aire arrastrado que viajan muy rápido, alejándose del centro emisor (Figura 8).

Las plumas de Densidad de Corriente Co-Piroclástica (DCCo-P) se forman a partir de la propagación de depósitos de partículas de una DCP y arrastres de aire, resultando en una flotabilidad reversa, por lo cual, la densidad de DCP se vuelve menor que a la del ambiente. La mezcla de flotabilidad separa de la porción densa de la corriente y arrastra más aire a medida que se eleva. Porque la velocidad inicial es menor y la densidad de la mezcla es equivalente al ambiente, plumas DCCo-P no tienen un componente *jet*, ya que son solamente convectivas. Al igual que las plumas derivadas de centros emisores, una vez que alcanza la flotabilidad neutral, se propaga lateralmente.

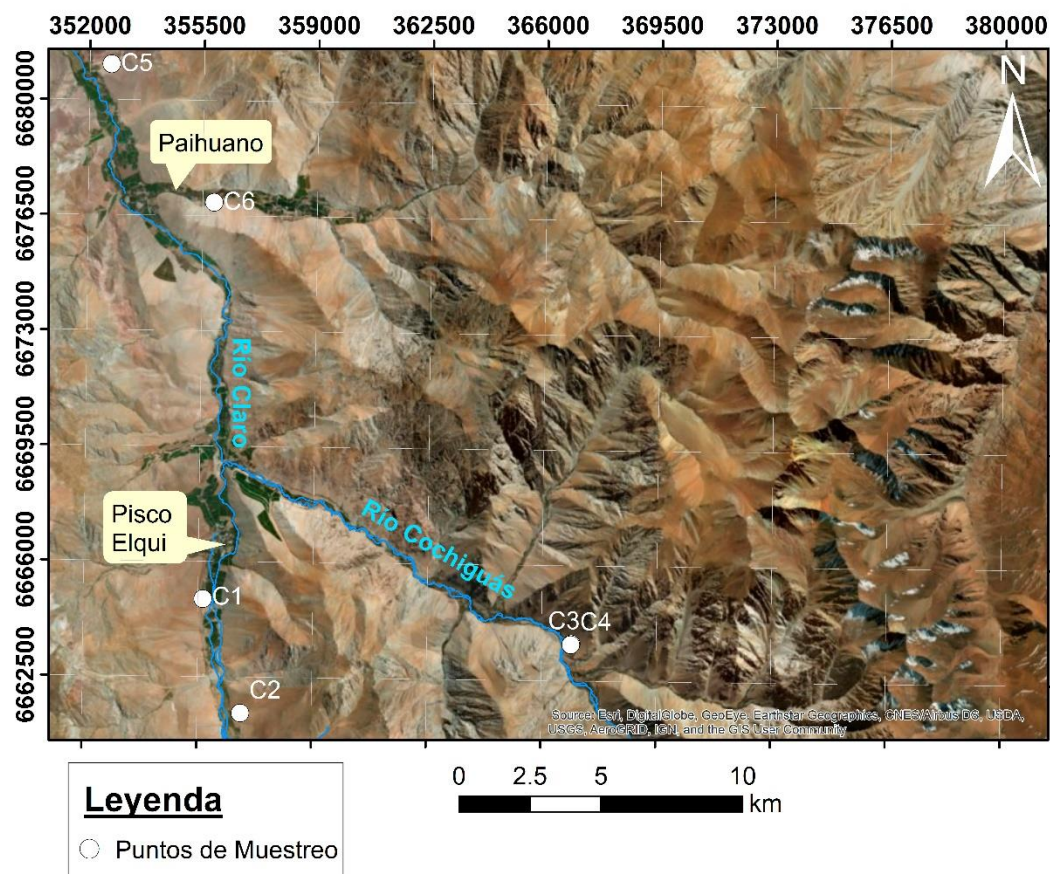
## **4.Resultados**

### **4.1 Depósitos de cenizas volcánicas**

La zona de estudio se encuentra a 370 km aproximadamente al norte de la Zona Volcánica Sur (ZVS) y 280 km aproximadamente al sur de la Zona Volcánica Central (ZVC).

Se visitaron seis depósitos (C1, C2, C3, C4, C5 y C6) los cuales están ubicados en distintos puntos de los valles del Río Claro y Cochiguás, quebradas Paihuano y Tres Cruces (Figura 9 y Tabla 2). En cada afloramiento se hizo una columna estratigráfica y se realizó una descripción.

En cada punto, cuando se describa la presencia de clastos, estos corresponden en este trabajo a fragmentos líticos accidentales, los cuales son provenientes de la meteorización y erosión de las rocas aledañas, y son incorporados en los depósitos.



**Figura 9: Zona de estudio y puntos de muestreo (C1, C2, C3, C4, C5, C6). En los valles de los ríos Claro y Cochiguás, Quebrada Tres Cruces y Quebrada Paihuano.**

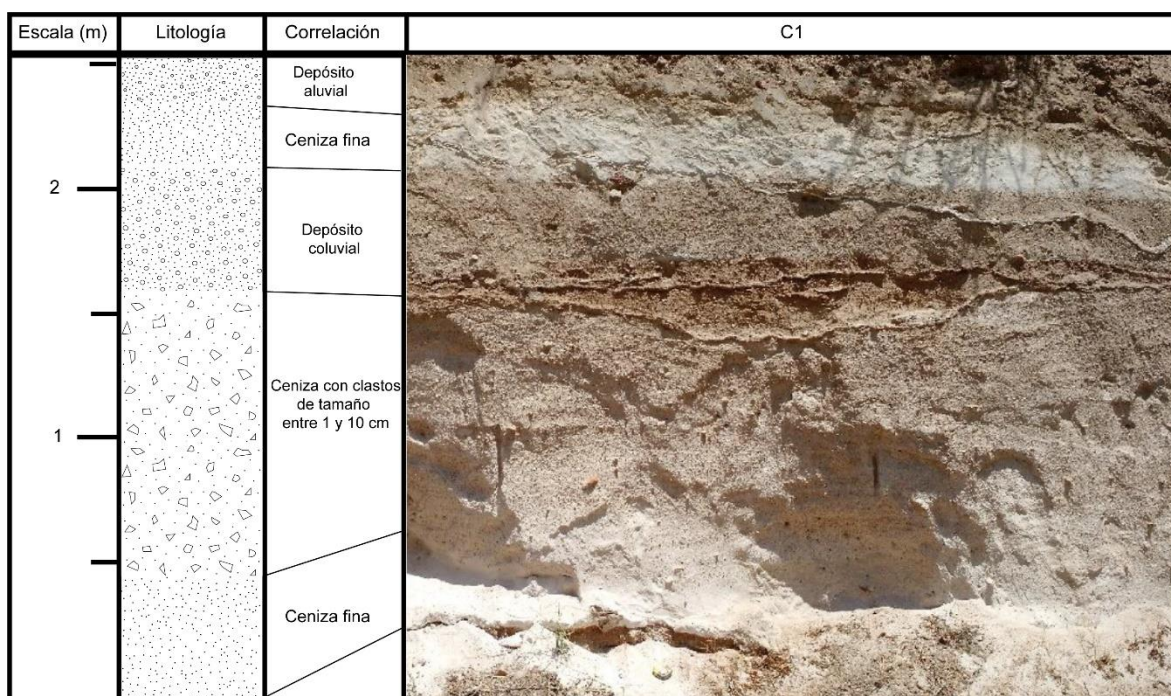
**Tabla 2: Coordenadas GPS en UTM de los puntos de muestreo.**

| Punto | E      | N       | Localidad               |
|-------|--------|---------|-------------------------|
| C1    | 355651 | 6664864 | Pisco Elqui             |
| C2    | 356828 | 6661404 | Pisco Elqui             |
| C3    | 366909 | 6663634 | Valle del río Cochiguás |
| C4    | 366893 | 6663602 | Valle del río Cochiguás |
| C5    | 352657 | 6681076 | Quebrada Tres Cruces    |
| C6    | 355845 | 6676905 | Quebrada Paihuano       |



#### 4.1.1 Punto C1

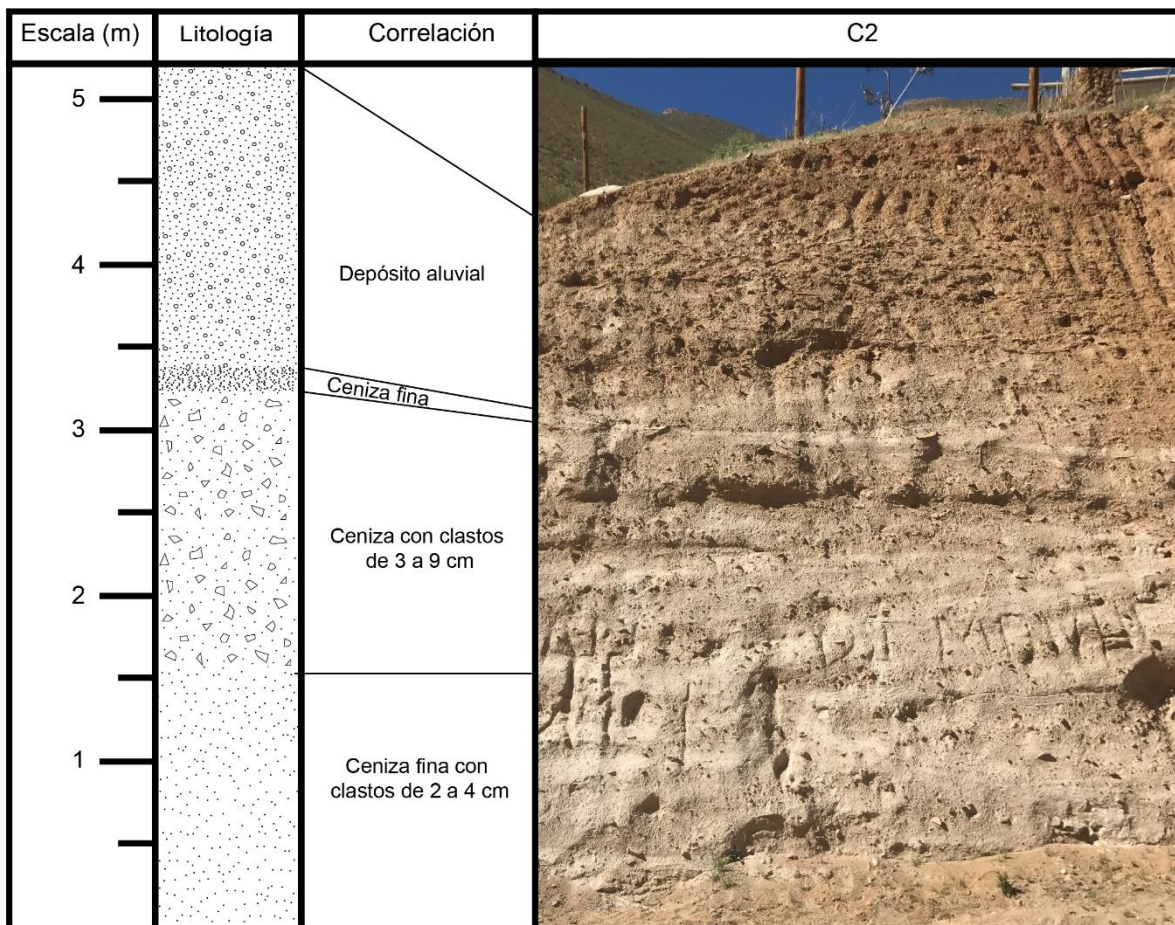
Se identificaron tres niveles de cenizas. En la parte basal del afloramiento hay una capa de cenizas de color blanco con ausencia de clastos y una potencia estimada de 40cm. En la parte central del depósito de 1m de potencia aproximadamente, se distingue del nivel anteriormente mencionado por presentar color blanco rojizo y la presencia de clastos polimícticos (clastos de los coluvios) que varían en tamaño de 1 a 10cm. La capa de cenizas superior, al igual que el nivel basal, presenta una ausencia de clastos (coluviales) y es de color blanco y se encuentra entre un depósito coluvial y uno aluvial. En este afloramiento es posible observar el depósito de ceniza de mayor tamaño con respecto a los demás observados en este trabajo (Figura 10). Además, se observan vetillas de carbonato (de 2 a 5 cm de espesor) en una capa de ceniza y entre los límites de depósitos aluviales y ceniza.



**Figura 10: Columna estratigráfica representativa del afloramiento en el Punto C1, Localidad de Pisco Elqui.**

#### 4.1.2 Punto C2

Hacia la base se encuentra una capa de cenizas de color blanco grisáceo con una baja concentración de clastos polimícticos que varían de tamaño entre 2 y 4 cm, con una potencia estimada de 1,5m aprox. La zona intermedia corresponde a una capa de cenizas de color blanca grisácea con clastos de mayor tamaño, variando entre 3 y 9 cm, la potencia de esta capa es de 1,4 m aprox. Sobre esta capa hay un nivel de 30cm de ceniza fina de color blanco con ausencia de clastos. Hacia el techo de este afloramiento se observa un depósito aluvial. El contacto con el nivel de ceniza fina es irregular (ver Figura 11).

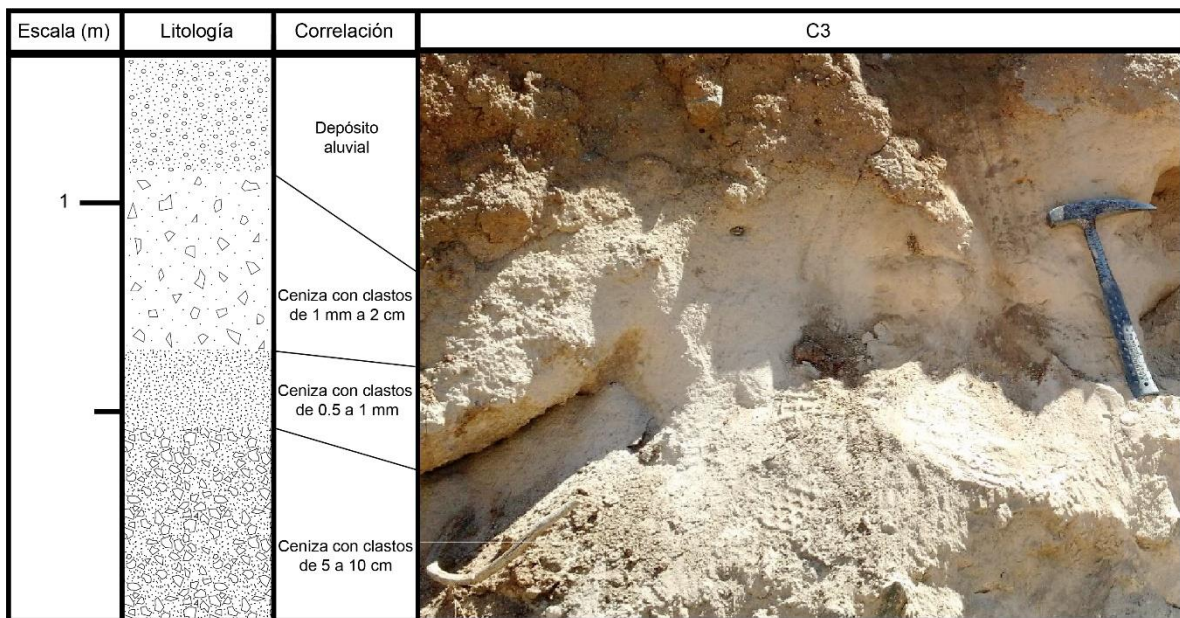


**Figura 11: Columna estratigráfica representativa del afloramiento en el Punto C2, Localidad de Pisco Elqui.**



#### 4.1.3 Punto C3

La potencia de este afloramiento con relación a los anteriores es mucho menor, no superando los 1,5m. Hacia la base se halla ceniza de color blanco con clastos variando de 5 a 10cm de tamaño. En la zona intermedia, ceniza con clastos que no superan un milímetro, mientras que hacia el techo los rangos varían de 1mm a 2cm. Al igual que en punto anterior, las cenizas subyacen a depósitos aluviales (ver Figura 12).



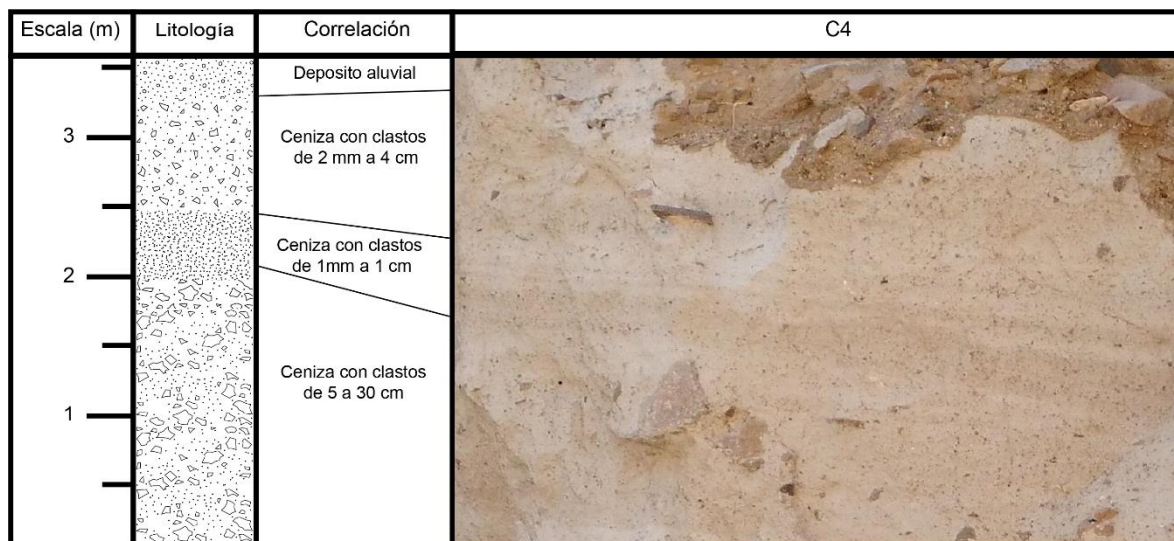
**Figura 12: Columna estratigráfica representativa del afloramiento en el Punto C3, Localidad de Valle del Río Cochiguás.**

#### 4.1.4 Punto C4

La secuencia estratigráfica, en base al orden en donde se hallan los clastos de mayor tamaño, es similar al punto anterior, debido a que los clastos de mayor tamaño se hallan en la base y los menores en la zona intermedia del afloramiento. Lo anterior, puede ser producto de la cercanía entre ambos afloramientos. Sin embargo, en todos los niveles de ceniza, este punto contiene clastos de mayor tamaño que en C3, pudiendo encontrar clastos de hasta 30cm en la base. La potencia total de esta columna es levemente mayor a 3,5m. Como se puede



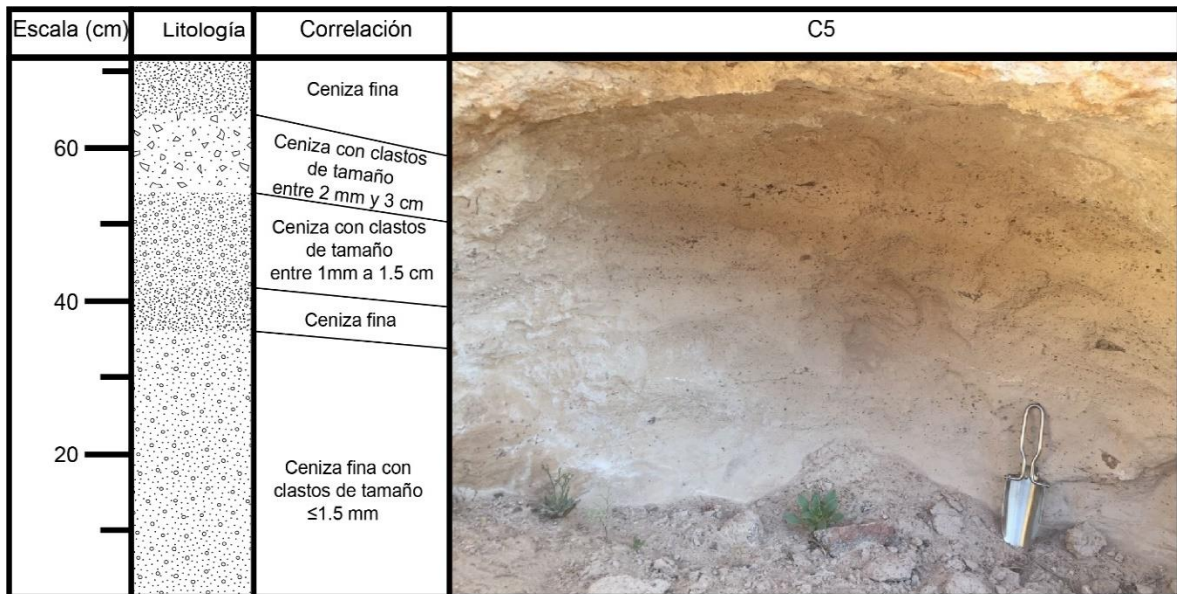
observar en la Figura 13, los depósitos aluviales se encuentran sobre los niveles de cenizas.



**Figura 13: Columna estratigráfica representativa del afloramiento en el Punto C4, Localidad de Valle del Río Cochiguás.**

#### 4.1.5 Punto C5

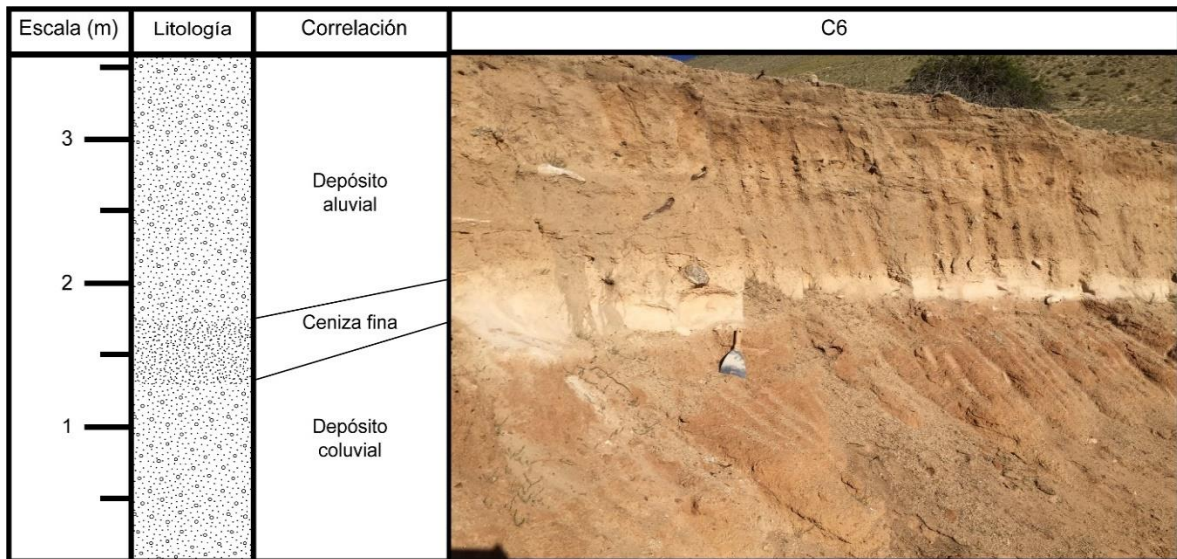
Las cenizas en este punto son de color blanco, variando su color a leves tonalidades grisáceas. Son separadas por niveles que solo se diferencian entre sí por el tamaño de los clastos polimícticos. La penúltima capa de cenizas presenta clastos imbricados. A rasgos generales los clastos de mayor tamaño se encuentran hacia el techo de este afloramiento. Las cenizas se encuentran debajo de un depósito aluvial (Figura 14).



**Figura 14: Columna estratigráfica representativa del afloramiento en el Punto C5, Localidad de Quebrada Tres Cruces.**

#### 4.1.6 Punto C6

Como se puede observar en la Figura 15, en este afloramiento se observa un nivel de ceniza fina de color blanco, entre un depósito coluvial y uno aluvial. El contacto superior entre el depósito aluvial y la capa de cenizas es transicional. No hay clastos de gran tamaño en el nivel de ceniza. El depósito aluvial superior está en transición a suelo.



**Figura 15: Columna estratigráfica representativa del afloramiento en el Punto C6, Localidad de Quebrada Paihuano.**

## 4.2 Análisis Granulométrico

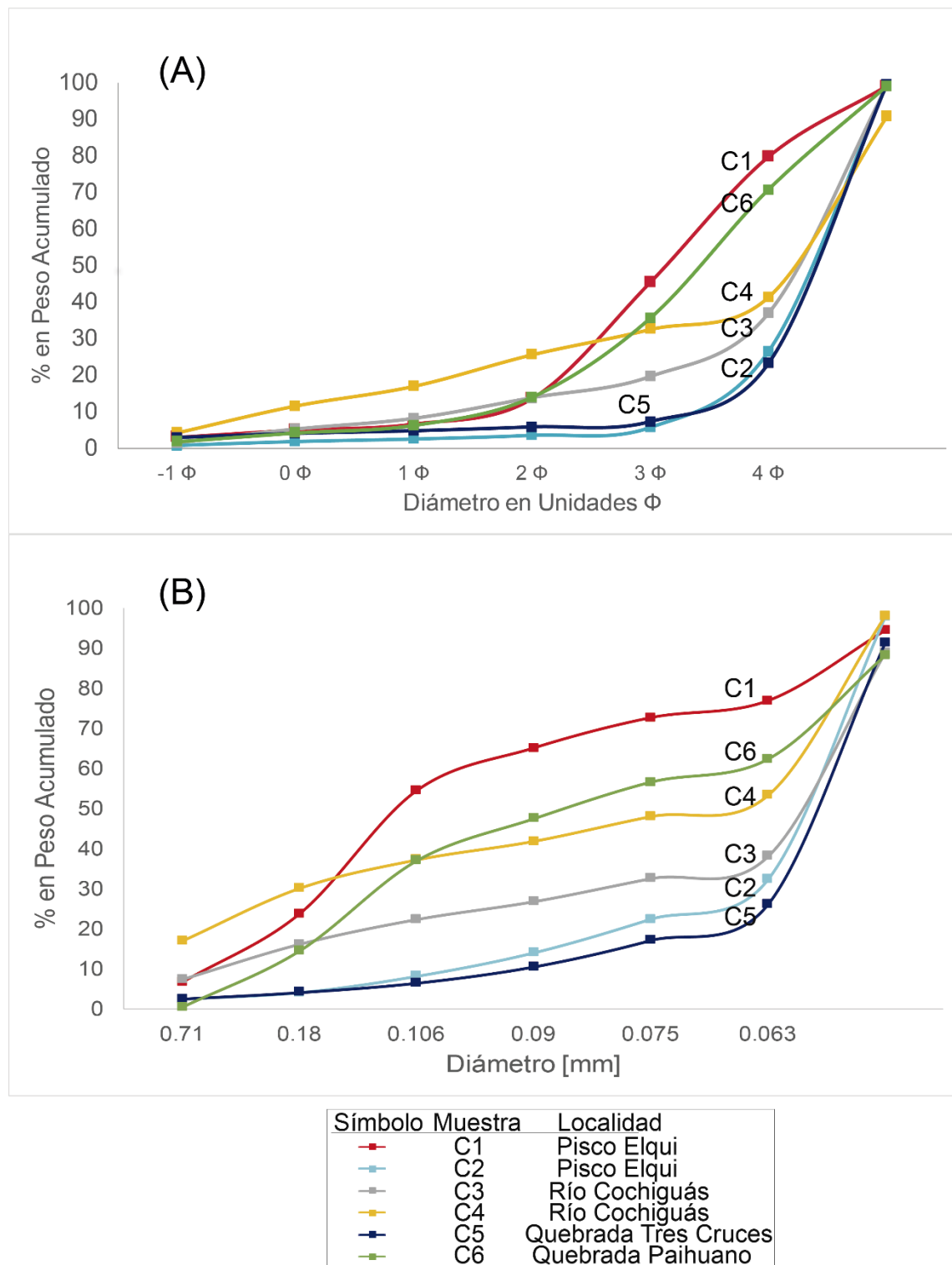
El análisis granulométrico se realizó en las muestras recolectadas en cada uno de los depósitos de cenizas (Figura 9).

En los gráficos (A) y (B) de la Figura 16 es posible observar que se generan dos comportamientos distintos en cada curva granulométrica, correspondientes a los depósitos C1 y C6 para una familia, y C2, C3, C4 y C5 para la otra. Siendo la segunda familia la enriquecida en material fino en ambos ensayos granulométricos.

En la Localidad de Pisco Elqui, al hacer una comparación entre las muestras C1 y C2 hay una notoria diferencia, C1 tiene aproximadamente 50% del material en la fracción gruesa, mientras que la muestra C2 el 70% corresponde a material de granulometría fina.

En la localidad de río Cochiguás (muestra C4) hay un enriquecimiento en material fino, presentando un 50% de material cercano a las 63 micras (Figura 16 (B)). La muestra C3 presenta mayor contenido en material fino.

Para la muestra C5, en la Figura 16 (A y B), se puede observar que en su totalidad corresponde a material de granulometría muy fina. Mientras que la muestra C6, presenta material de granulometría más gruesa.



**Figura 16: Curva granulométrica del % en peso acumulado por diámetro de partículas.**

## 4.3 Componentes

Luego del tamizado, fueron escogidas una fracción gruesa (180 $\mu$ m) y una fracción fina (63 $\mu$ m), con el objetivo de realizar un análisis porcentual de las componentes de los depósitos.

La descripción de los componentes se realizó en base a una agrupación según la localidad cercana al depósito, con objeto de determinar si existen diferencias entre estos.

Cabe destacar que en esta sección los líticos corresponden a líticos monocristales accidentales, provenientes de las rocas circundantes. La morfología del juvenil en cada muestra corresponde en su totalidad a esquirlas de vidrio tipo “bubble-shard”. En la Tabla 3 se encuentra el detalle del análisis porcentual.

### 4.3.1 Localidad: Pisco Elqui

Las muestras correspondientes a esta localidad son:

1. C1
2. C2

A) Fracción 180  $\mu$ m:

- Líticos: La fracción 180 $\mu$ m presenta porcentajes variables en el contenido de cristales, oscilando entre un 31% y un 80% del total. Pudiendo reconocer cristales subhedrales a euhedrales de plagioclasa transparente a rosada sin alteración, con pátinas de calcopirita y covelina en algunos casos, cristales de cuarzo translúcido, escasos cristales de biotita oxidada, en menor cantidad anfíbola oxidada.
- Juveniles: En esta fracción los juveniles comprenden principalmente de esquirlas de vidrio, alcanzando entre 20% y 70% del total. Son incoloros y se encuentran impregnados de carbonato.

B) Fracción 63µm:

- Líticos: En esta fracción, el contenido de cristales alcanza valores entre un 20% y un 25% del total. Pudiendo reconocer cristales de cuarzo translúcido con pátinas de covelina, cristales euhedrales de plagioclasa levemente rosada, biotita oxidada, en menor cantidad anfíbola oxidada y escasos cristales de titanita amorfa translúcida a amarilla.
- Juveniles: Comprenden de esquirlas de vidrio incoloras que abarcan entre un 75% y un 80% del total.

**4.3.2 Localidad: Valle del Río Cochiguás**

Las muestras correspondientes a esta localidad son:

1. C3
2. C4

A) Fracción 180µm:

- Líticos: En esta fracción comprenden casi la totalidad de las muestras, alcanzando un valor de 99%. Pudiendo reconocer cristales de plagioclasa levemente rosada con pátinas de calcopirita, cuarzo translúcido, feldespatos alterados a arcilla, biotita oxidada, anfíbola oxidada, titanita amorfa translúcida a amarilla.
- Juveniles: Comprenden de esquirlas de vidrio translúcidas que abarcan entre el 1% y 2% del total de las muestras.

B) Fracción 63µm:

- Líticos: En esta fracción el contenido de cristales alcanza valores entre un 41% y un 63% del total de las muestras, y principalmente corresponden a cristales de plagioclasa incolora, feldespatos argilizados, biotita oxidada, cuarzo translúcido y anfíbola oxidada.

- Juveniles: Comprenden de esquirlas de vidrio translúcidas que alcanzan valores entre un 37% y un 59% del total de las muestras.

#### **4.3.3 Localidad: Quebrada Tres Cruces**

La muestra correspondiente a esta localidad es:

##### **1. C5**

##### **A) Fracción 180µm:**

- Líticos: El contenido de cristales corresponde a un 72% del total de la muestra. Comprenden de plagioclasas de color rosado, cuarzo translúcido, biotita oxidada, anfíbolos oxidados y titanitas amorfas.
- Juveniles: En esta fracción el contenido de juveniles corresponde a esquirlas de vidrio translúcidas que alcanzan valores del 29% de la muestra total.

##### **B) Fracción 63µm:**

- Líticos: Los cristales en la fracción de 63µm abarcan un 13% del total de muestra. Correspondiendo a cristales translúcidos de cuarzo, cristales subeuhedrales a euhedrales de plagioclase incolora a rosada, biotita oxidada y escasos cristales de titanita.
- Juveniles: El contenido de juveniles corresponde a esquirlas de vidrio translúcidas inalteradas que abarcan el 87% del total de la muestra.



#### **4.3.4 Localidad: Quebrada Paihuano**

La muestra correspondiente a esta localidad es:

##### **1. C6**

##### **A) Fracción 180µm:**

- **Líticos:** El contenido de cristales comprende a un 23% del total de muestra, y corresponden a cristales de cuarzo translúcido, cristales subeuhedrales a euhedrales de plagioclasa rosada, biotita oxidada y escasos cristales de titanita amorfa.
- **Juveniles:** La cantidad de juveniles presentes abarcan el 77% de la muestra, corresponden a esquirlas de vidrio y en escasas pómez, alteradas levemente por carbonatos.

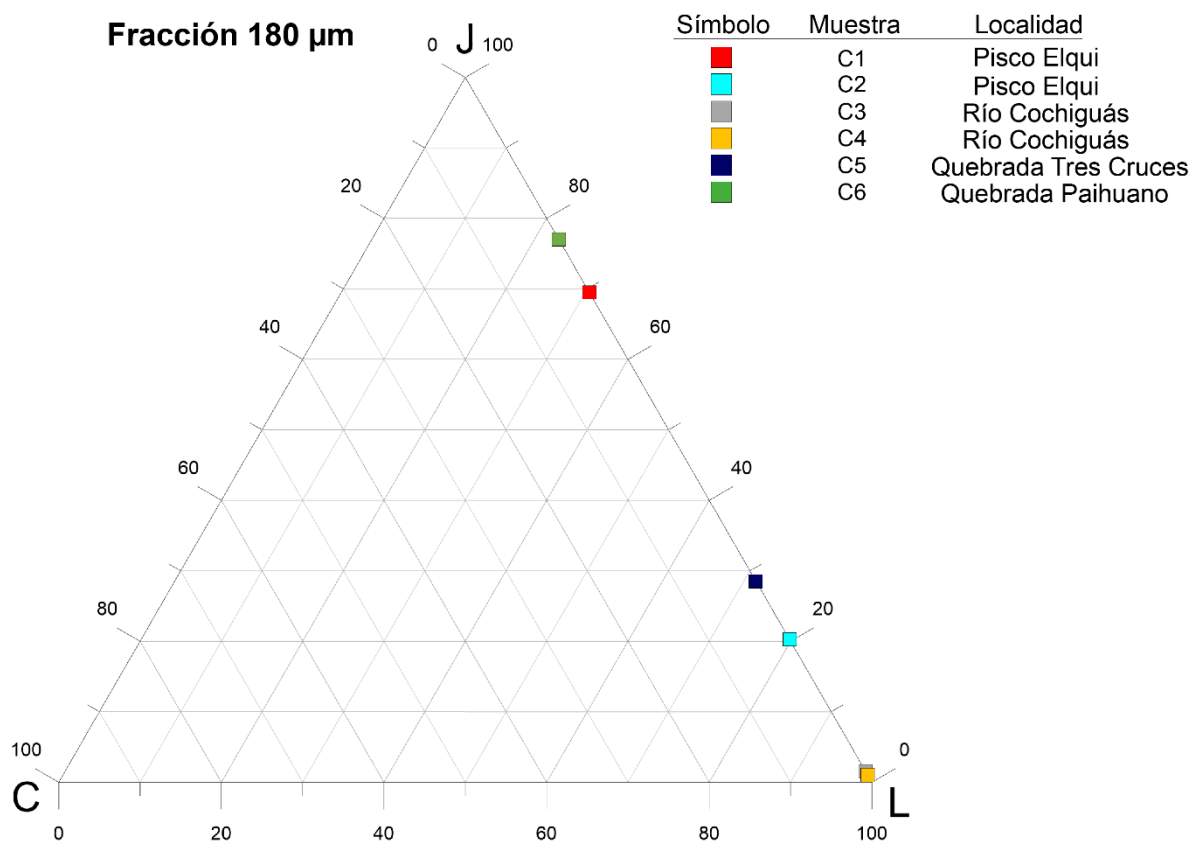
##### **B) Fracción 63µm:**

- **Líticos:** Los cristales en esta fracción abarcan un 16% de la muestra, corresponden a cristales de cuarzo translúcido, plagioclasas subeuhedrales rosadas, anfíbolas y en menor cantidad biotitas oxidadas.
- **Juveniles:** Abarcan casi la totalidad de esta fracción, alcanzando un 84% del total de la muestra. Corresponden a esquirlas de vidrio translúcidas que no presentan alteración.

**Tabla 3: Tabla resumen de componentes por muestra**

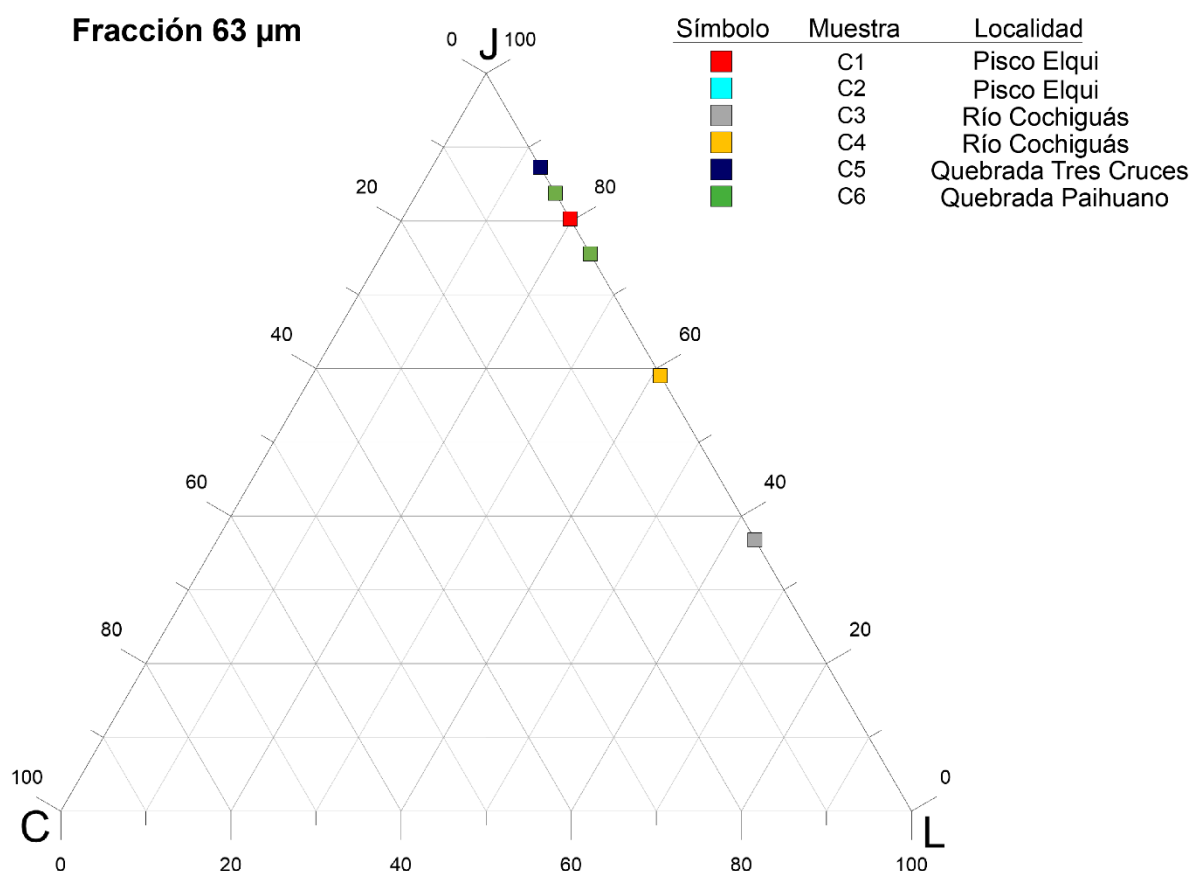
| Muestra   | Localidad                      | Fracción     | Total Líticos |       | Total Juveniles |       | Total Cristales |   |
|-----------|--------------------------------|--------------|---------------|-------|-----------------|-------|-----------------|---|
|           |                                |              | n             | %     | n               | %     | n               | % |
| <b>C1</b> | <b>Pisco Elqui</b>             | <b>180µm</b> | 122           | 30.5  | 278             | 69.5  | 0               | 0 |
|           |                                | <b>63µm</b>  | 79            | 19.75 | 321             | 80.25 | 0               | 0 |
| <b>C2</b> | <b>Pisco Elqui</b>             | <b>180µm</b> | 319           | 79.75 | 81              | 20.25 | 0               | 0 |
|           |                                | <b>63µm</b>  | 98            | 24.5  | 302             | 75.5  | 0               | 0 |
| <b>C3</b> | <b>Valle del Río Cochiguás</b> | <b>180µm</b> | 394           | 98.5  | 6               | 1.5   | 0               | 0 |
|           |                                | <b>63µm</b>  | 253           | 63.25 | 147             | 36.75 | 0               | 0 |
| <b>C4</b> | <b>Valle del Río Cochiguás</b> | <b>180µm</b> | 396           | 99    | 4               | 1     | 0               | 0 |
|           |                                | <b>63µm</b>  | 164           | 41    | 236             | 59    | 0               | 0 |
| <b>C5</b> | <b>Quebrada Tres Cruces</b>    | <b>180µm</b> | 286           | 71.5  | 114             | 28.5  | 0               | 0 |
|           |                                | <b>63µm</b>  | 51            | 12.75 | 349             | 87.25 | 0               | 0 |
| <b>C6</b> | <b>Quebrada Paihuano</b>       | <b>180µm</b> | 92            | 23    | 308             | 77    | 0               | 0 |
|           |                                | <b>63µm</b>  | 65            | 16.25 | 335             | 83.75 | 0               | 0 |

En resumen, según los componentes descritos para la fracción de 180 µm, se puede establecer que la totalidad de las muestras son diferentes entre sí, presentando variaciones en el contenido de líticos y juveniles (Figura 17), sin embargo, existe una cercanía entre las muestras de C1 y C6, correspondientes a Pisco Elqui y Quebrada Paihuano respectivamente, siendo la muestra de la Quebrada Paihuano la que contenga mayor porcentaje de juveniles con respecto a la de Pisco Elqui. La otra similitud agrupa las muestras C2 de Pisco Elqui con C5 de la Quebrada Tres Cruces, siendo la muestra C2 la que contenga menor contenido de juveniles. Existe solo una similitud notoria, la cual corresponde de las muestras C3 y C4 de la localidad de Río Cochiguás, siendo estas las que contengan casi en su totalidad líticos monocristales como la componente principal en la fracción de 180 µm.



**Figura 17: Diagrama JCL (Juveniles-Cristales-Líticos, modificado del diagrama Pómez-Cristales-Líticos) para las muestras analizadas que corresponden a la fracción 180  $\mu\text{m}$**

En resumen, según los componentes descritos para la fracción 63  $\mu\text{m}$ , se puede establecer que hay similitudes entre las muestras correspondientes a Pisco Elqui y Quebradas Tres Cruces y Paihuano (Figura 18), presentando alto contenido de juveniles, siendo C5 la de mayor porcentaje y C2 la de menor entre estas. Para el caso de las muestras de Río Cochiguás, presentan una notoria diferencia, siendo C4 enriquecida en juveniles con respecto a C3 y viceversa.



**Figura 18: Diagrama JCL (Juveniles-Cristales-Líticos, modificado del diagrama Pómez-Cristales-Líticos) para las muestras analizadas que corresponden a la fracción 63  $\mu\text{m}$ .**

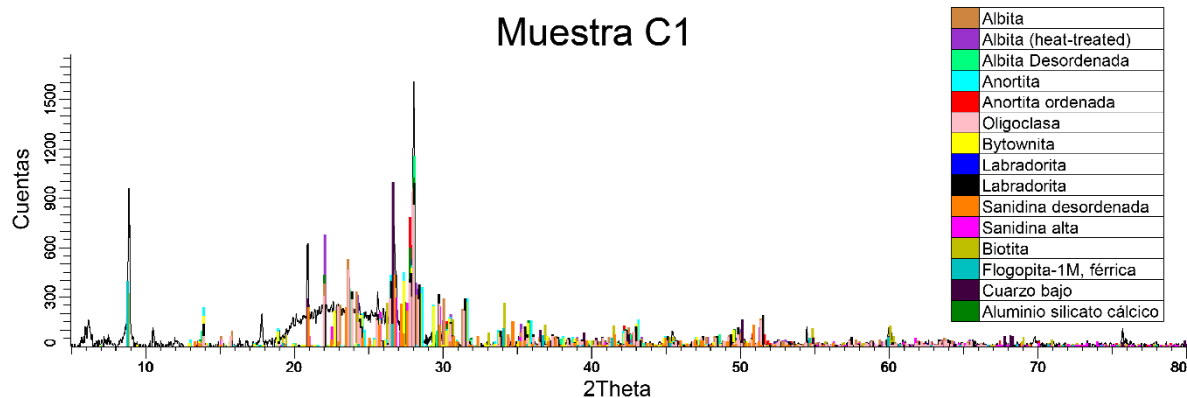
## 4.4 Análisis mediante Difracción de Rayos X (DRX)

### 4.4.1 Mineralogía

La evaluación realizada no contempla el contenido de amorfos en la mineralogía, a continuación se presenta el difractograma (con su respectiva evaluación). Una tabla resumen de los minerales y sus proporciones semicuantitativas se encuentran en el ANEXO I.

Las fases minerales encontradas corresponden a: plagioclasa, feldespato, micas, cuarzo y otros.

**C1**

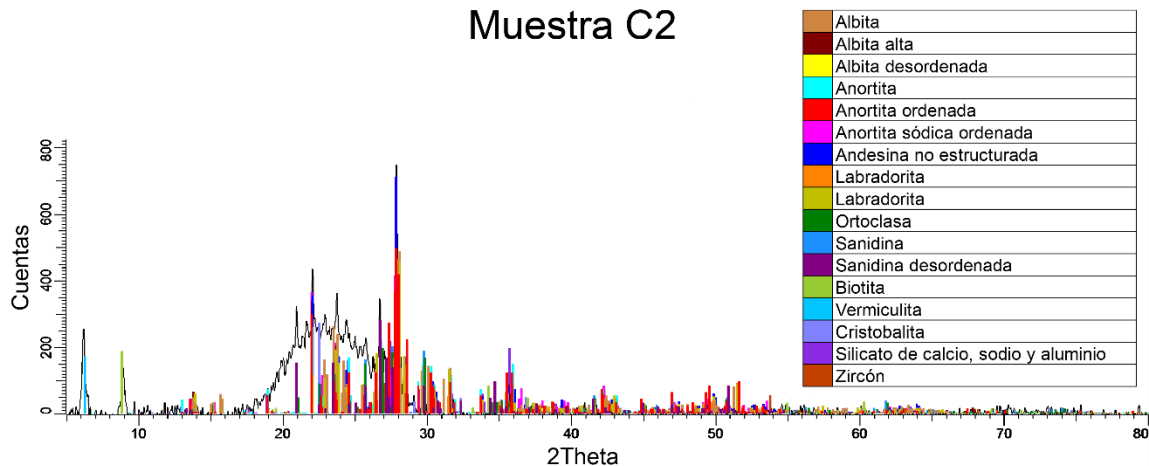


**Figura 19: Difractograma evaluado mediante Diffrac Suite EVA para muestra C1.**

**Tabla 4: Contenido de fases minerales en % semicuantitativo para muestra C1, no se toma en cuenta el % de amorfos.**

| Fases minerales | % semicuantitativo |
|-----------------|--------------------|
| Plagioclasa     | 81.9               |
| Feldespato      | 5.4                |
| Mica            | 4.1                |
| Cuarzo          | 1.5                |
| Otros           | 7.1                |

## C2

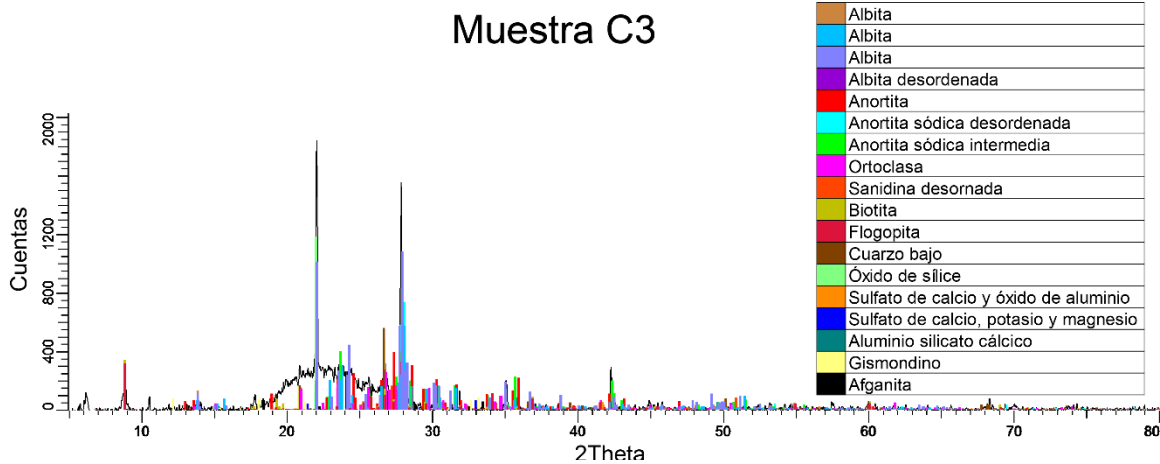


**Figura 20: Difractograma evaluado mediante Diffrac Suite EVA para muestra C2.**

**Tabla 5: Contenido de fases minerales en % semicuantitativo para muestra C2, no se toma en cuenta el % de amorfos.**

| Fases minerales | % semicuantitativo |
|-----------------|--------------------|
| Plagioclasea    | 80.9               |
| Feldespatos     | 8.5                |
| Mica            | 1.5                |
| Cuarzo          | 0.5                |
| Otros           | 8.6                |

## C3



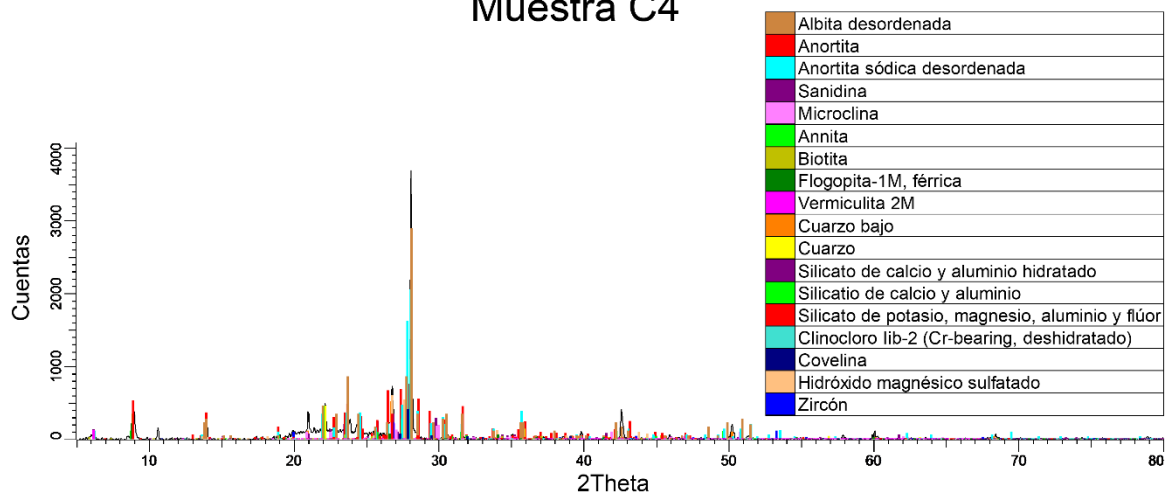
**Figura 21: Difractograma evaluado mediante Diffrac Suite EVA para muestra C3.**

**Tabla 6: Contenido de fases minerales en % semicuantitativo para muestra C3, no se toma en cuenta el % de amorfos.**

| Fases minerales | % semicuantitativo |
|-----------------|--------------------|
| Plagioclasa     | 62.1               |
| Feldespato      | 5.4                |
| Mica            | 3.7                |
| Cuarzo          | 13.5               |
| Otros           | 15.3               |

## C4

### Muestra C4

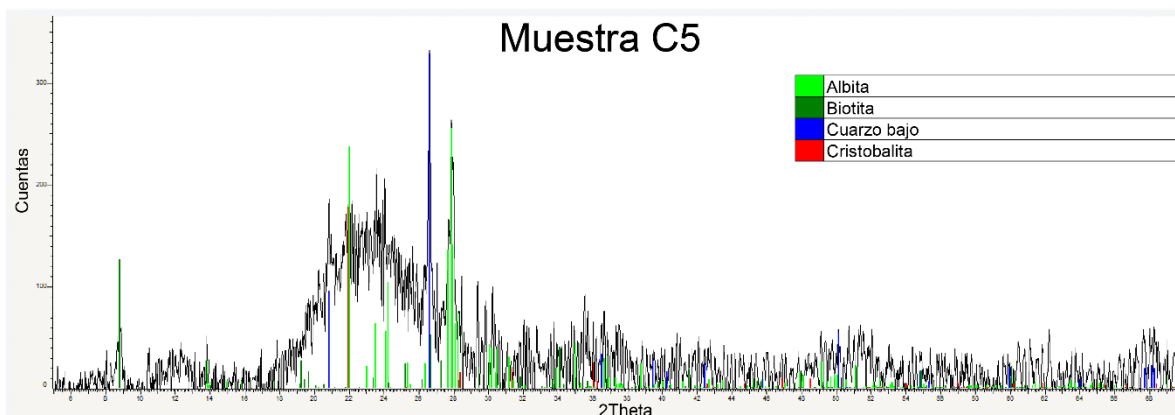


**Figura 22: Difractograma evaluado mediante Diffrac Suite EVA para muestra C4.**

**Tabla 7: Contenido de fases minerales en % semicuantitativo para muestra C4, no se toma en cuenta el % de amorfos.**

| Fases minerales | % semicuantitativo |
|-----------------|--------------------|
| Plagioclasa     | 62.4               |
| Feldespato      | 7.7                |
| Mica            | 3.2                |
| Cuarzo          | 1.5                |
| Otros           | 25.2               |

**C5**



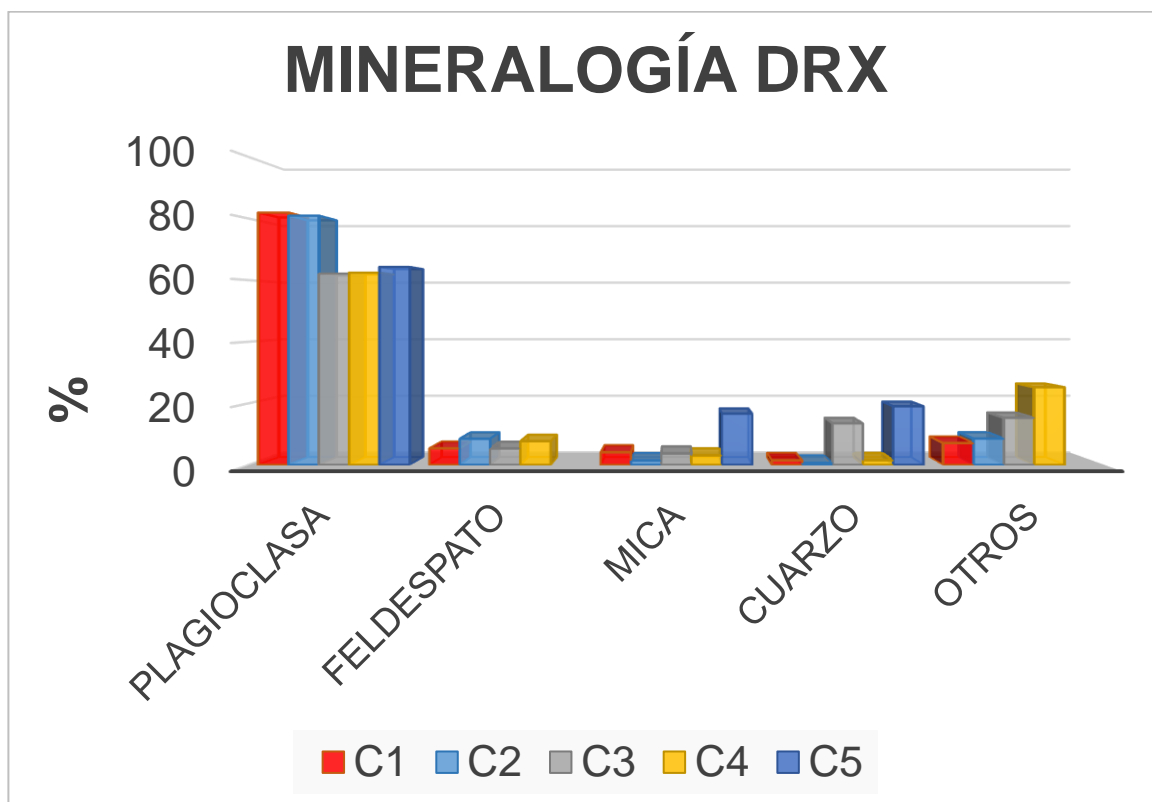
**Figura 23: Difractograma evaluado mediante Diffrac Suite EVA para muestra C5.**

**Tabla 8: Contenido de fases minerales en % semicuantitativo para muestra C5, no se toma en cuenta el % de amorfos.**

| Fases minerales | % semicuantitativo |
|-----------------|--------------------|
| Plagioclasa     | 64.3               |
| Mica            | 16.7               |
| Cuarzo          | 19                 |



Para efectos comparativos entre cada muestra, en la Figura 24 se expone el contenido mineralógico de cada muestra.



**Figura 24: Gráfico de contenido de mineralogía semicuantitativa en las muestras C1 a C5.**

#### 4.4.2 Amorfos

El contenido de amorfos fue obtenido mediante la evaluación del difractograma en Difracc Suite EVA. Los resultados son expuestos en la Figura 25. Si bien, todas las muestras analizadas presentan mayor contenido de amorfos que cristales, se debe destacar que la muestra que presenta mayor cantidad de amorfos es la C2 y la mayor cantidad de cristalinidad es la muestra C1.

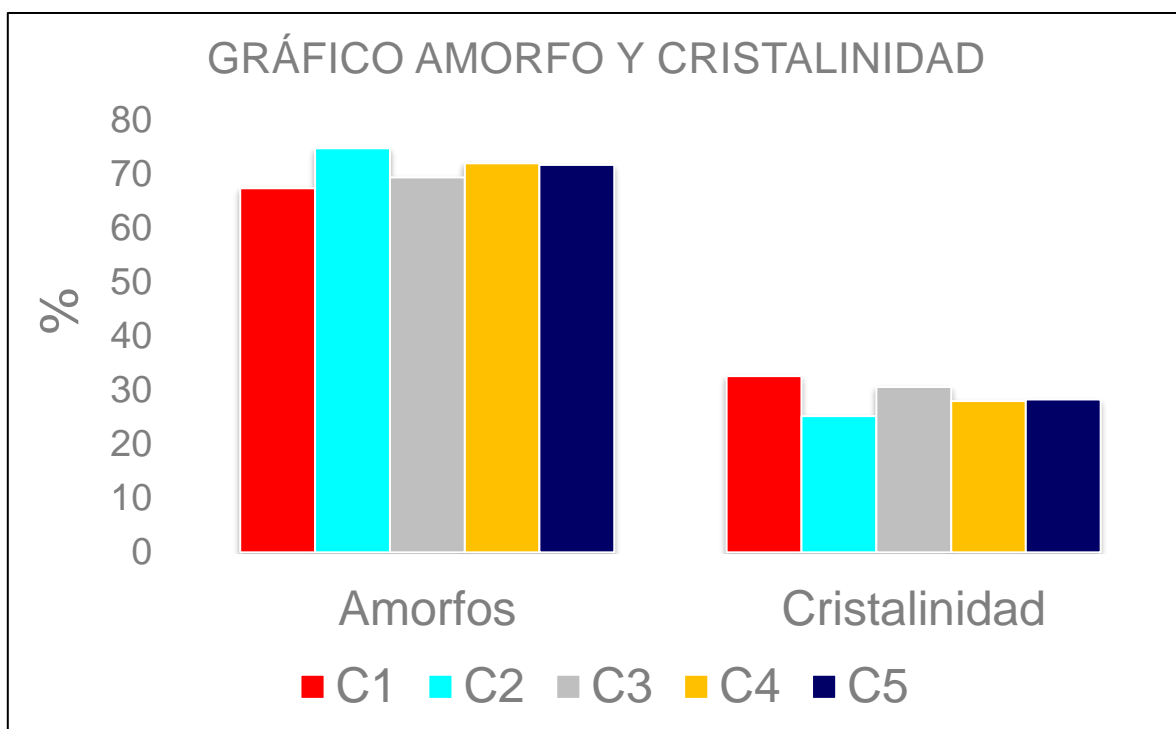


Figura 25: Gráfico de contenido de amorfos y cristalinidad por muestra.

## **4.5 Caracterización microscópica de las cenizas volcánicas**

La caracterización microscópica de las cenizas volcánicas fue realizada mediante el Microscopio Electrónico de Barrido (MEB), se utilizó parte de la fracción bajo #230, posterior al tamizado para hacer el análisis granulométrico. Se seleccionaron las muestras C1, C3 y C5, las cuales corresponden a la localidad de Pisco Elqui, valle del Río Cochiguás y Quebrada Tres Cruces respectivamente. Se realizaron análisis de morfología y EDS (Anexo II) en cada muestra, escogiendo en algunos casos un punto y en otros dos puntos para obtener la química semicuantitativa de los puntos seleccionados. La química obtenida no es determinante ni comparable con la química de roca total, o de elementos mayores.

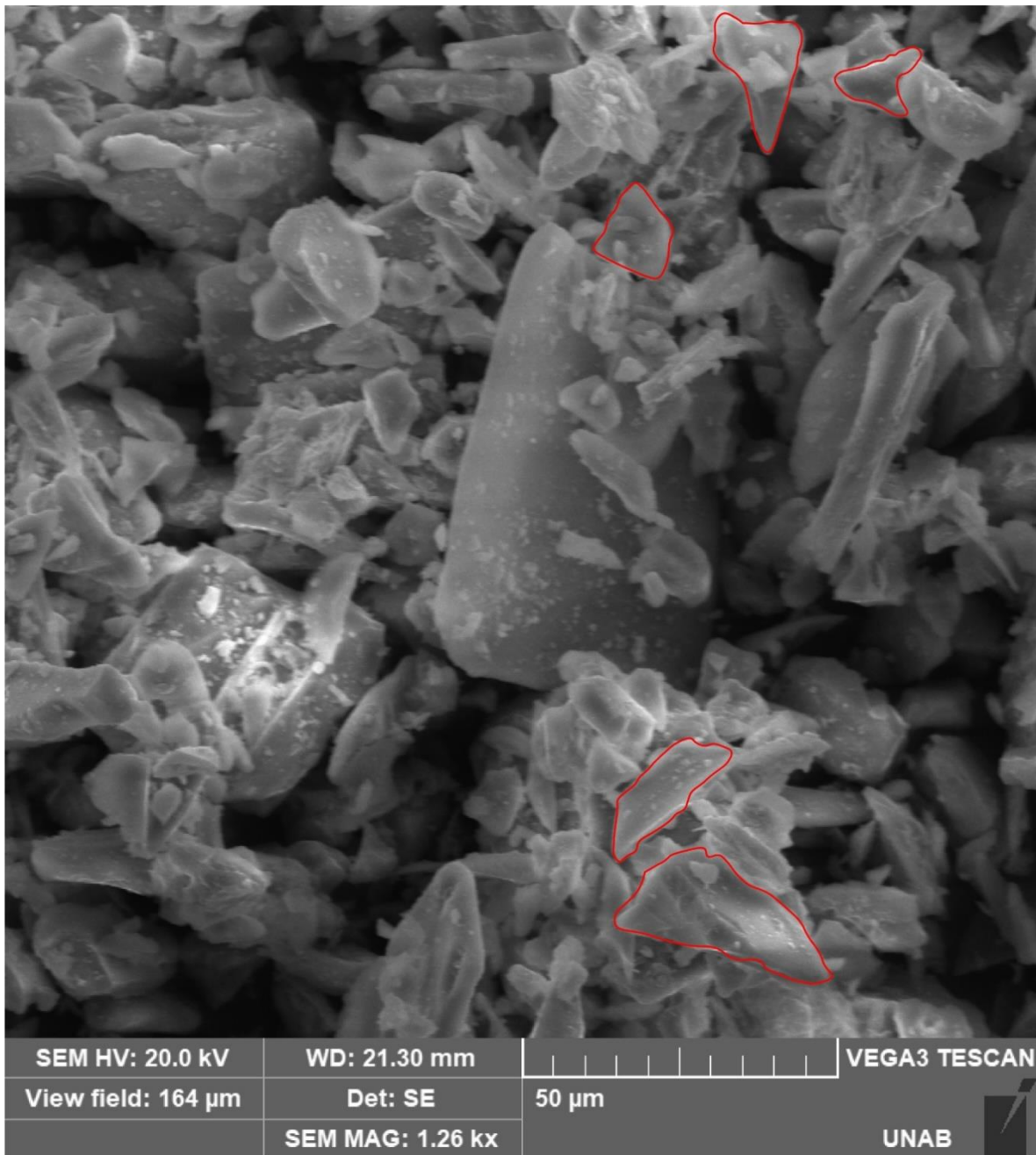
### **4.5.1 Pisco Elqui**

En la localidad de Pisco Elqui, específicamente en el Punto C1, como fue anteriormente mencionado, se puede observar a escala de afloramiento las partículas de mayor tamaño. Al realizar el análisis de componentes, hubo un enriquecimiento en juveniles para la fracción gruesa, y para analizar la morfología del vidrio a menor escala, se escogió una muestra de este punto para determinar si la cantidad de vidrio es similar.

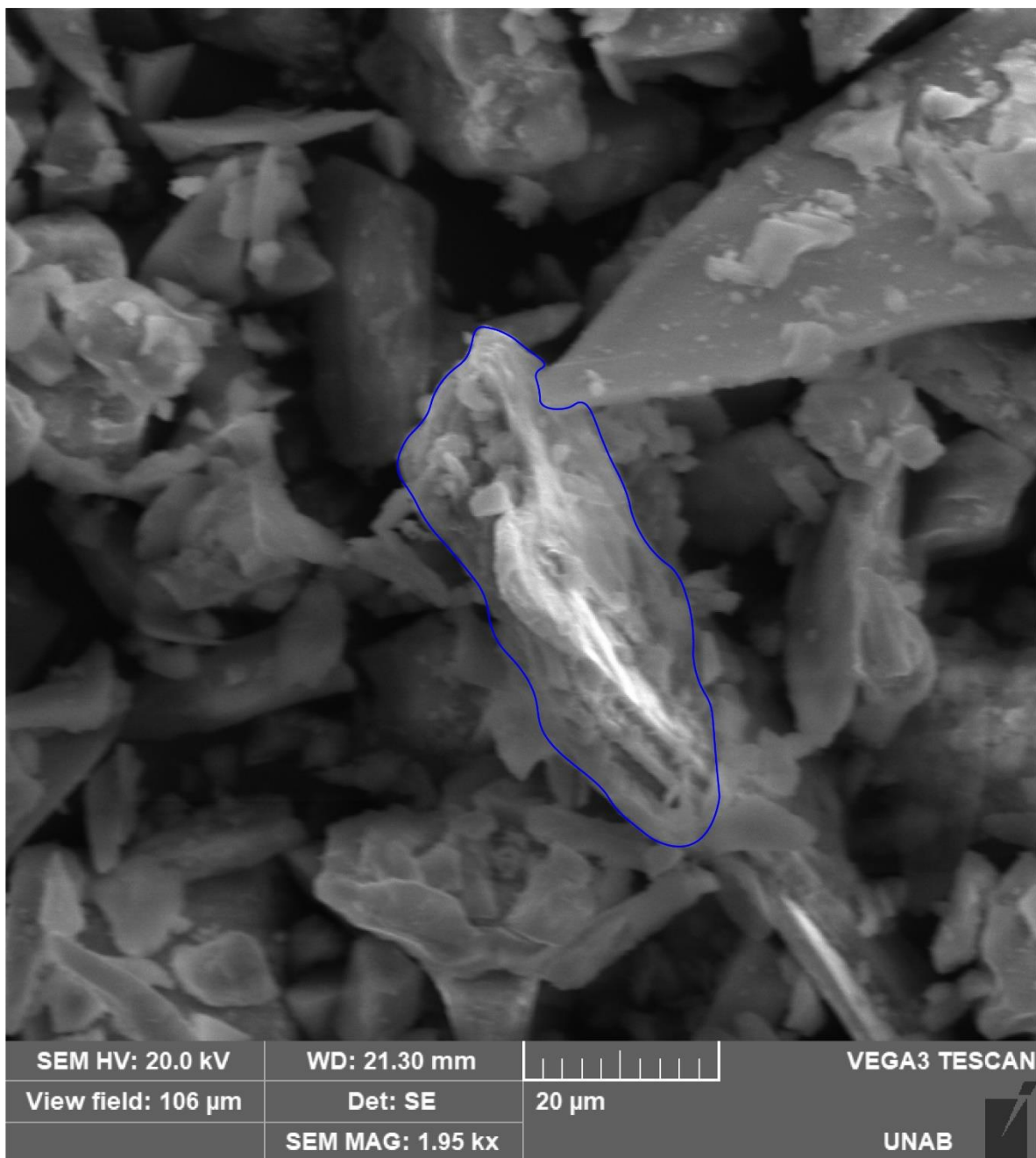
La muestra analizada en esta localidad presenta morfologías de vidrio tales como esquirlas de vidrio planas, esquirlas blocosas y escalonadas (observar Figuras 26 y 27). Se debe mencionar además que las partículas se encuentran cubiertas por arcillas.

Según el análisis por EDS, la química semicuantitativa arrojó:

- Dos cristales con altos “peaks” de O, Si, Al, K y bajos de Na, Fe y Ca, los cuales tendrían afinidad con un feldespatos potásico.



**Figura 26:** Imagen de Electrones Secundarios (ES) obtenidas en MEB en muestra C1. En rojo se presentan esquirlas de vidrio planas, cubiertas por partículas de arcilla.



**Figura 27:** Imagen de Electrones Secundarios (ES) obtenidas en MEB en muestra C1. En azul se presenta la vista lateral de una esquirla blocosa escalonada, cubiertas por partículas de arcilla.

#### **4.5.2 Valle del Río Cochiguás**

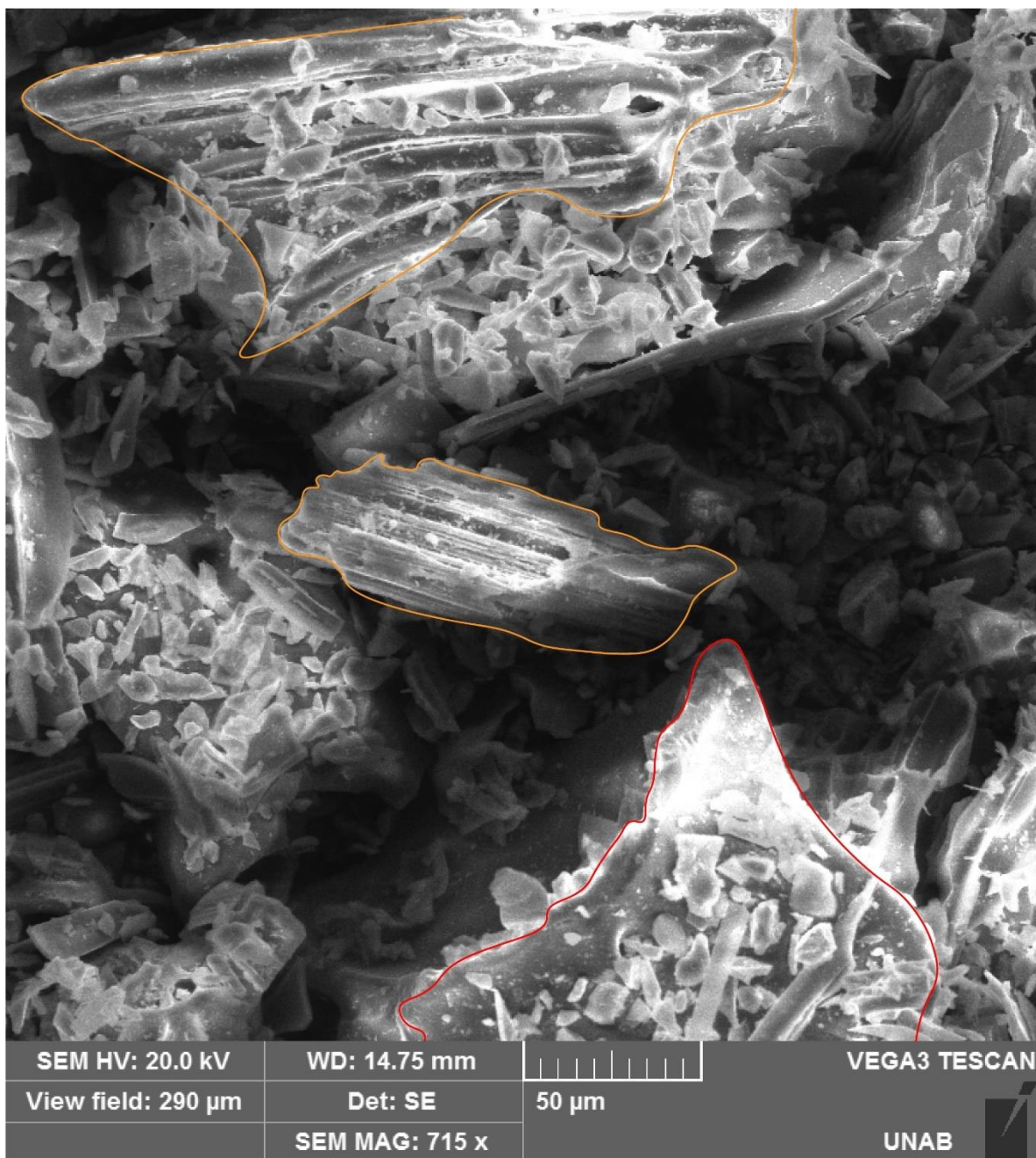
En la localidad del valle del Río Cochiguás, en el Punto C3, se extrajo una muestra de la zona intermedia del afloramiento, la cual presentaba clastos que no superaban el milímetro de diámetro. Luego de determinar las componentes, existe un empobrecimiento en juveniles para la fracción gruesa y la fracción fina. Sin embargo, para analizar por MEB, no se preparó la muestra de la misma manera que en los demás puntos, se utilizó la muestra tal cual había sido extraída directamente desde el afloramiento.

Luego de analizar la muestra seleccionada para esta localidad es posible encontrar esquirlas pumíceas fibrosas con canales de degasificación bien marcados, esquirlas de vidrio blocosas y vesiculares, cabe destacar además que las componentes juveniles se encuentran cubiertas por partículas de arcilla (Figura 28 y 29).

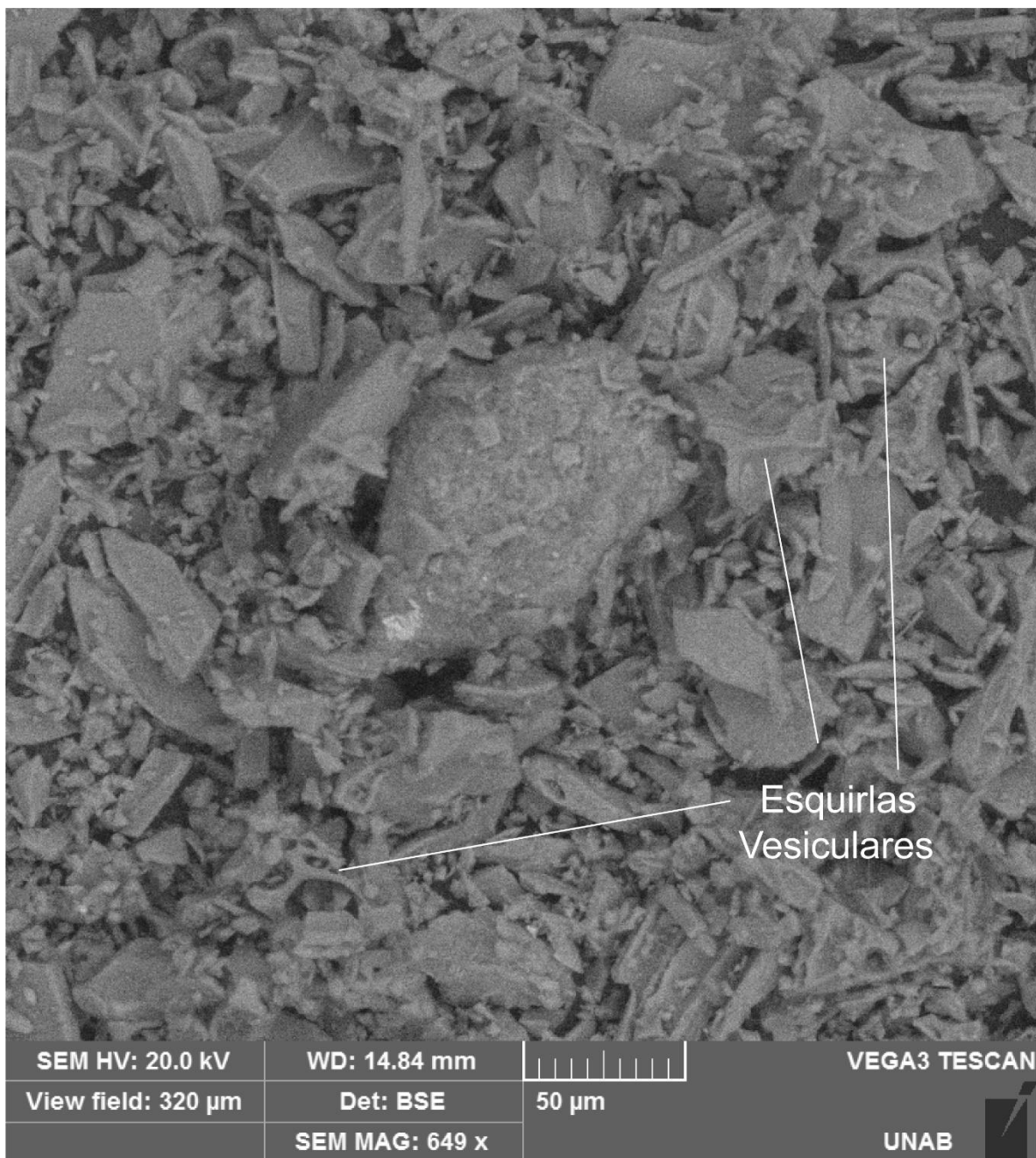
Según el análisis por EDS, la química semicuantitativa arrojó:

- Un cristal con altos “peaks” de O, Si, Al, K, Mg, Fe y bajo de Ti, el cual podría coincidir con un cristal de biotita (debido al contenido de Mg) o un cristal de titanita (debido al contenido de Ti).
- Por morfología, la partícula podría tratarse de una esquirla de vidrio (C3\_Z1\_2). Esta arrojó altos “peaks” de O, Si, N, K y bajos de Na, Fe, Ca.
- Por morfología, el vidrio del otro punto analizado (C3\_Z1\_3), presenta altos “peaks” de O, Si, Al, Ka, Na y bajo de Fe.





**Figura 28:** Imagen de Electrones Secundarios (ES) obtenidas en MEB en muestra C3. En color anaranjado se presenta una esquirla pumícea fibrosa con canales de degasificación muy bien marcados y en color rojo una esquirla de vidrio blocosa.



**Figura 29: Imagen de Electrones Secundarios (ES) obtenidas en MEB en muestra C3. Se presentan esquirlas vesiculares.**



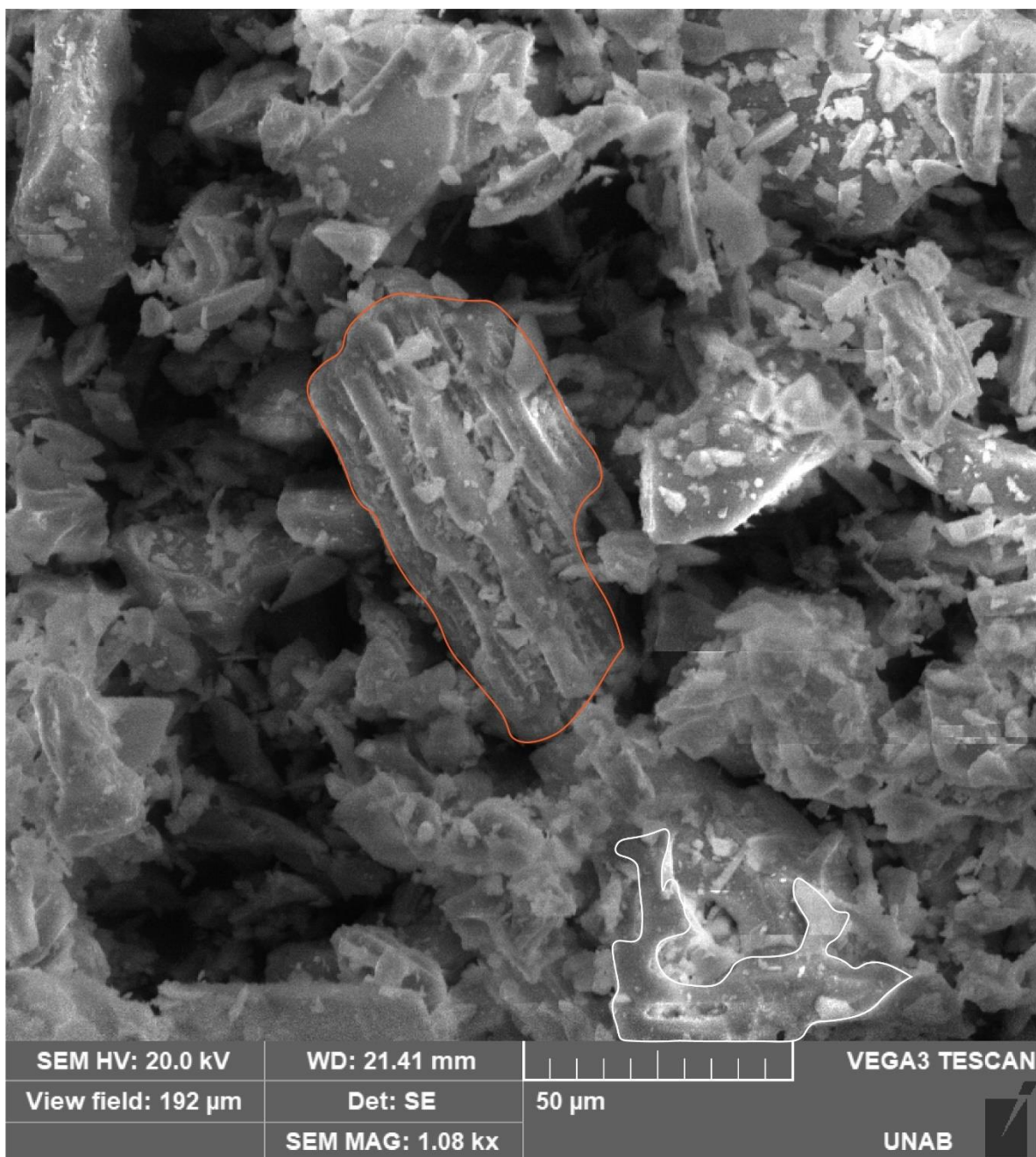
#### **4.5.3 Quebrada Tres Cruces**

En la localidad de Quebrada Tres Cruces, en el Punto C5, se extrajo una muestra en la zona inferior del afloramiento. Luego de analizar las componentes, en la fracción gruesa existe un empobrecimiento en componentes juveniles y ocurre lo contrario para la fracción fina. Para el análisis por MEB se tamizó y se utilizó la fracción bajo la #230.

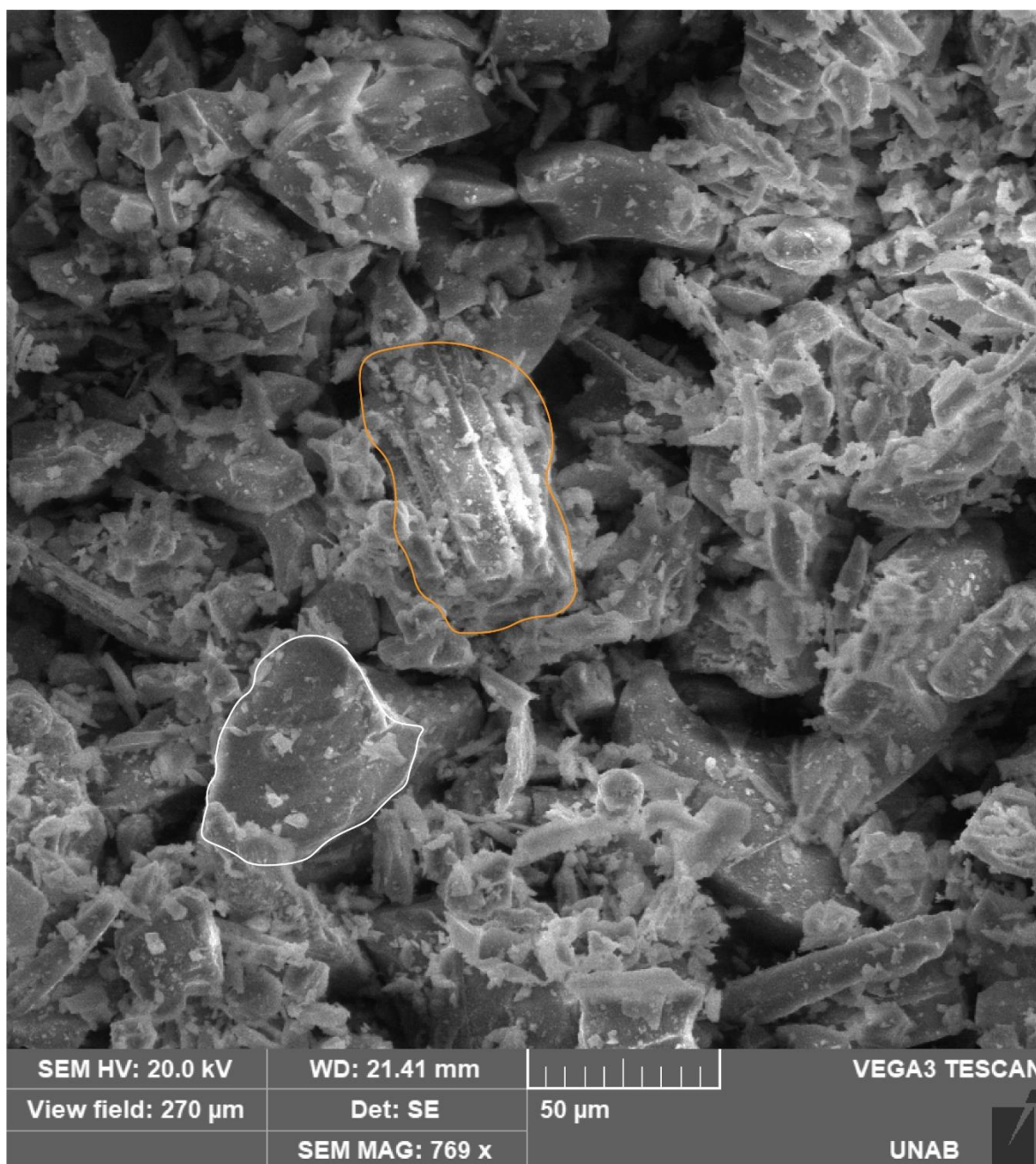
La muestra de este punto presenta esquirlas pumíceas fibrosas con canales de degasificación bien marcados, esquirlas de vidrio blocosas y en escasas ocasiones vesiculares, cabe destacar que todas las componentes juveniles se encuentran cubiertas por partículas de arcilla (Figuras 30, 31 y 32).

Según el análisis por EDS, la química semicuantitativa arrojó:

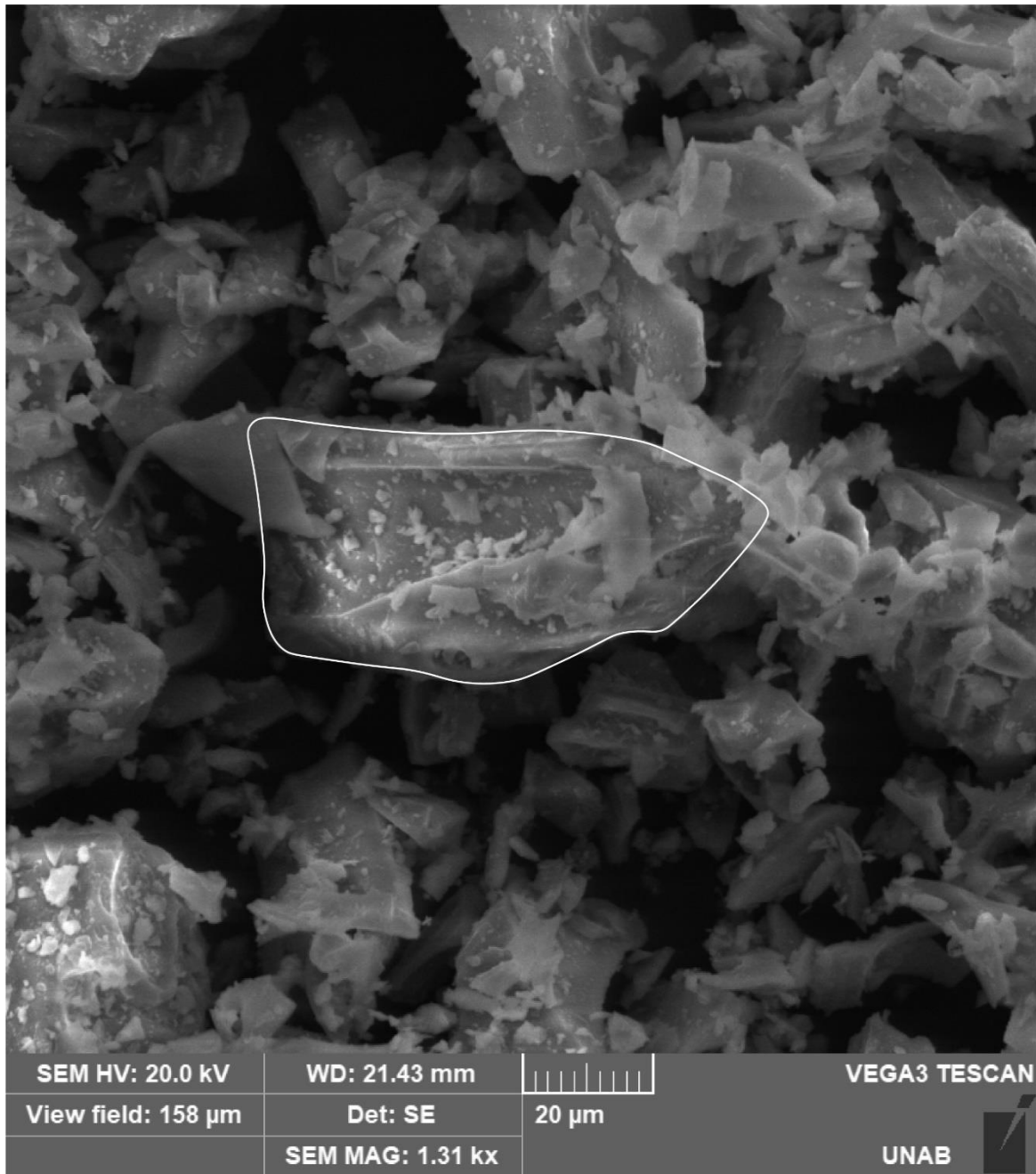
- Un cristal con altos “peaks” de O, Si, Al, Na, K y bajos de Fe, Ca, el cual podría coincidir con un cristal de feldespato potásico.
- Una pómez con altos “peaks” de O, Si, Al, K, Na y bajo de Fe.



**Figura 30: Imagen de Electrones Secundarios (ES) obtenidas en MEB en muestra C5. Se presenta en color anaranjado una esquirla pumícea y en blanco una esquirla vesicular.**



**Figura 31: Imagen de Electrones Secundarios (ES) obtenidas en MEB en muestra C5. Se presenta en color anaranjado una esquirla pumícea y en blanco una esquirla blocosa.**



**Figura 32: Imagen de Electrones Secundarios (ES) obtenidas en MEB en muestra C5. Se presenta en blanco una esquirra blocosa.**

A modo de resumen se expone en la Tabla 9, la morfología de vidrio observada en cada una de las muestras.

**Tabla 9: Tabla resumen de las morfologías de vidrio volcánico observado en cada muestra**

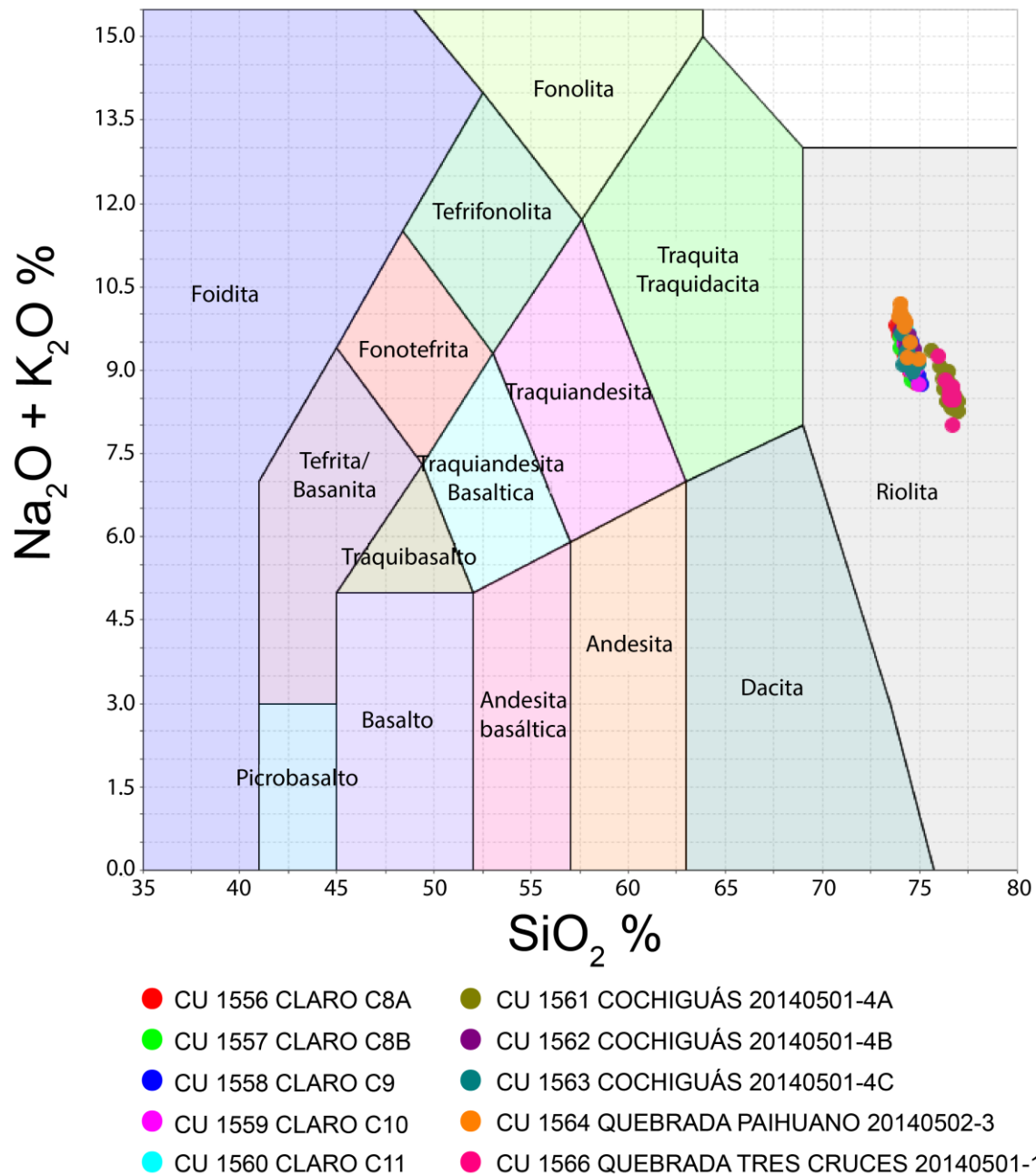
| Muestra | Localidad                  | Tipo de Morfología de Vidrio Volcánico |                        |                   |                     |                       |
|---------|----------------------------|--|------------------------|-------------------|---------------------|-----------------------|
|         |                            | Esquirla<br>blocosa                    | Esquirla<br>escalonada | Esquirla<br>plana | Esquirla<br>pumícea | Esquirla<br>vesicular |
| C1      | Pisco Elqui                | X                                      | X                      | X                 |                     |                       |
| C3      | Río<br>Cochiguás           | X                                      |                        |                   | X                   | X                     |
| C5      | Quebrada<br>Tres<br>Cruces | X                                      |                        |                   | X                   | X                     |

## 4.6 Geoquímica de elementos mayores

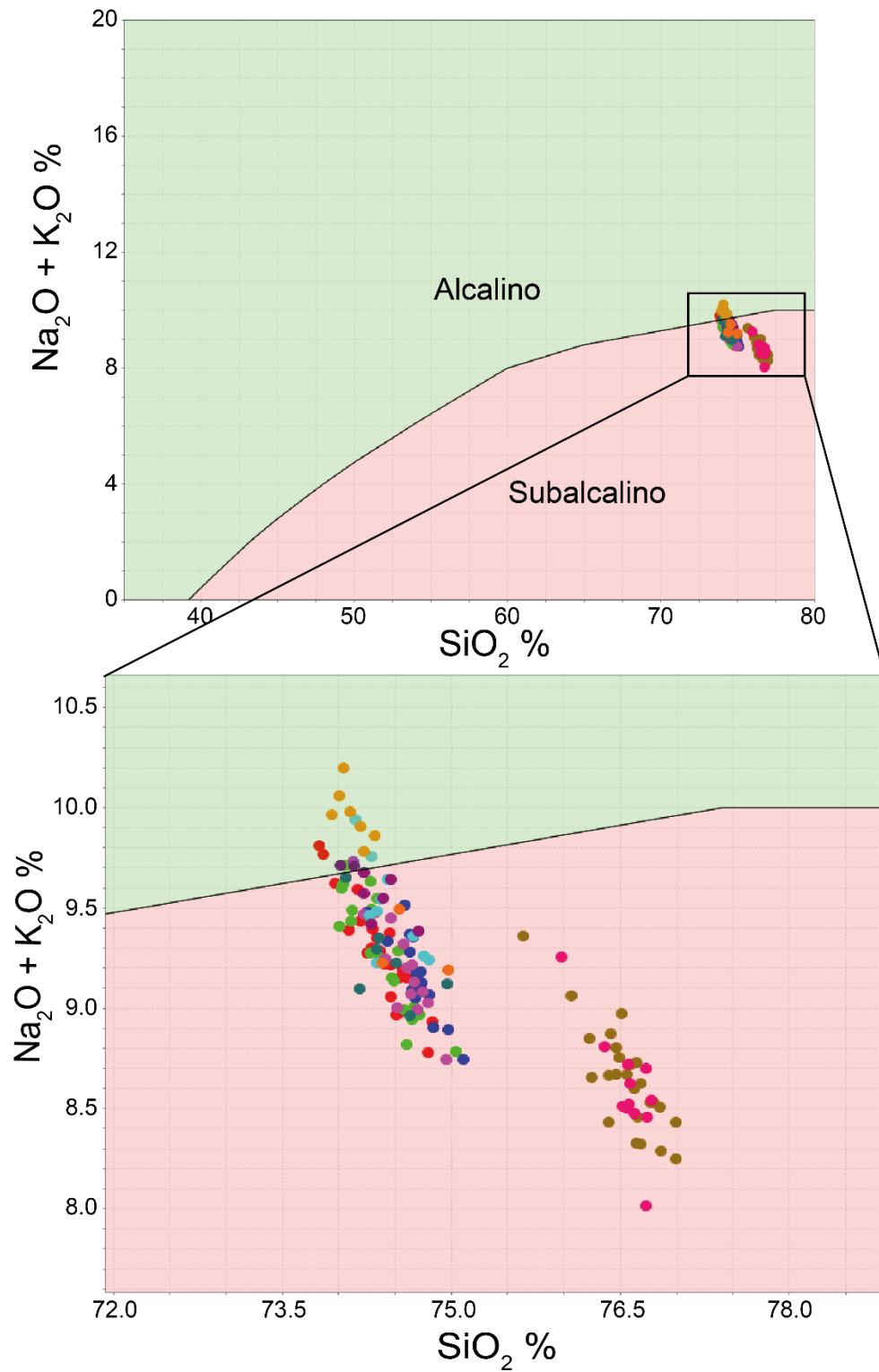
La geoquímica de este trabajo corresponde a datos inéditos obtenidos mediante análisis por microsonda electrónica realizado por Antinao *et al.*, 2015 en esquirlas de vidrio de 10 muestras recolectadas en los valles del Río Claro, Cochiguás, Quebradas Paihuano y Tres Cruces. El detalle analítico se encuentra en el ANEXO III.

Mediante el diagrama TAS (total álcalis-sílice) (Figura 33) se desprende que todas las muestras de las localidades mencionadas tienen composición riolítica. Además, es posible determinar la serie magmática a la cual se encuentran asociadas las muestras, la cual puede ser obtenida mediante el diagrama binario álcalis total vs sílice, con el límite de series propuesto por Irvine & Baragar (1971) (Figura 34). La mayoría de las muestras son subalcalinas, sin embargo, algunas muestras pasan la línea divisoria entrando al campo de los magmas alcalinos. También es destacable que a mayor SiO<sub>2</sub> disminuye el álcalis total.

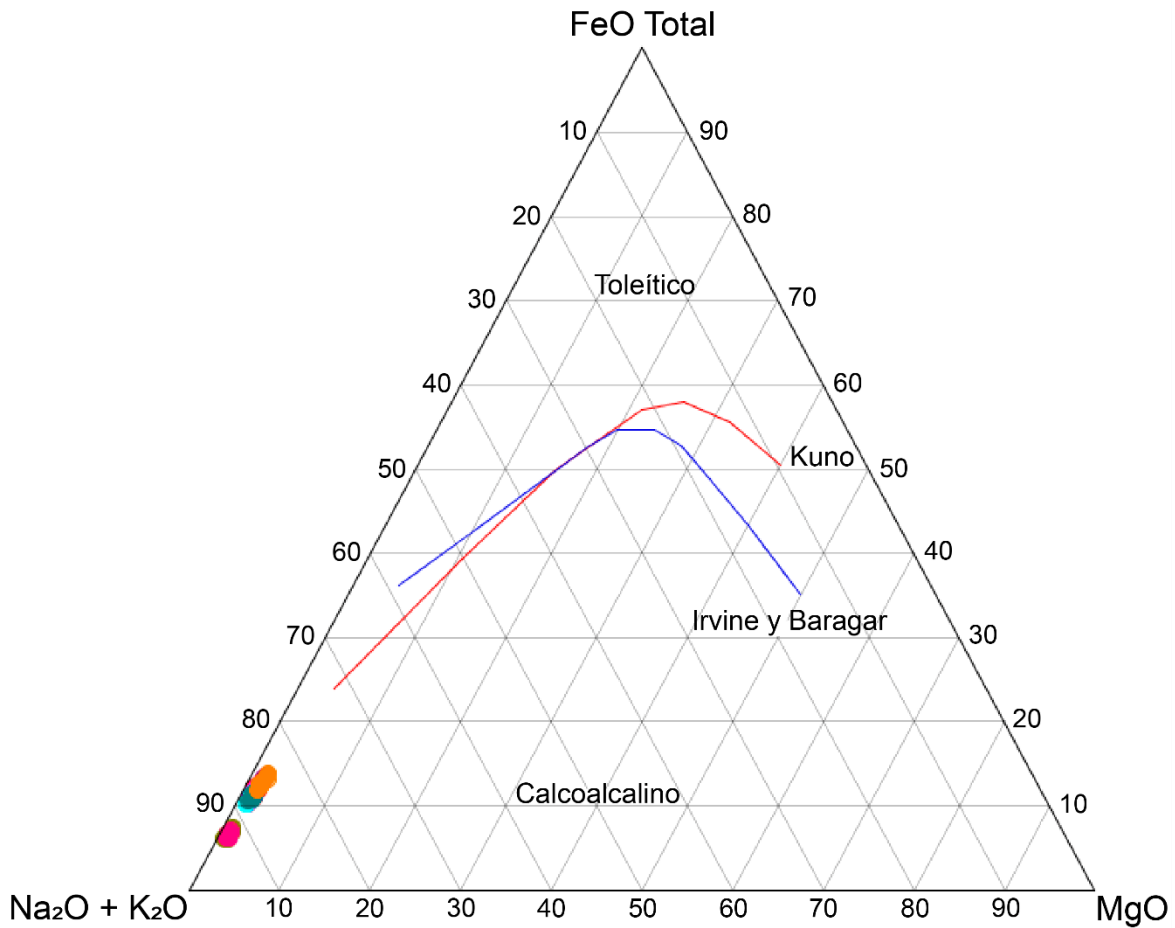




**Figura 33: Diagrama de clasificación  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  versus  $\text{SiO}_2$  para rocas volcánicas TAS (Total álcalis vs sílice) (Le Bas et al., 1986). Se exponen las muestras analizadas en este trabajo.**



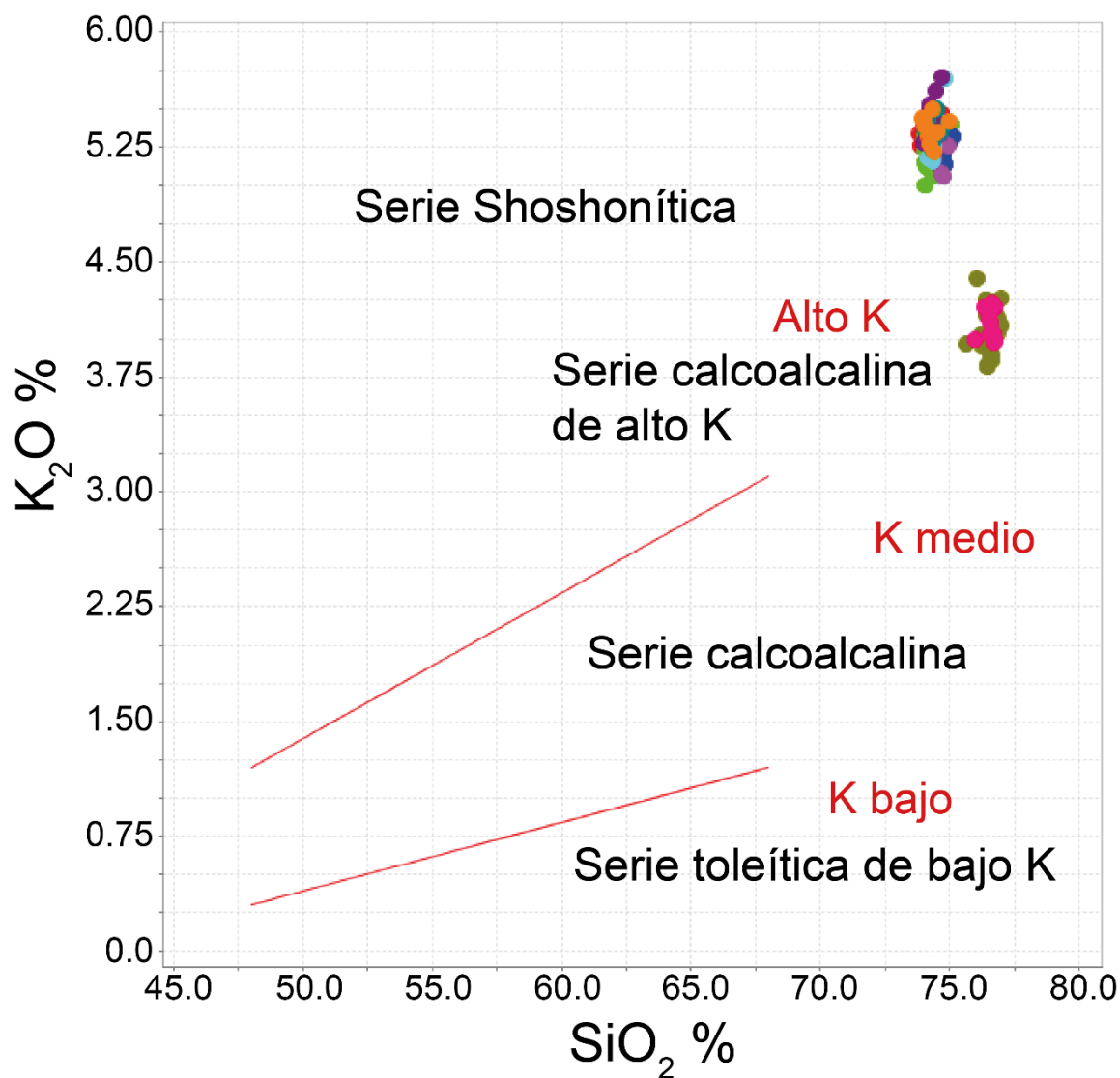
**Figura 34: Diagrama de las series magmáticas alcalina y subalcalina propuesto por Irvine & Baragar (1971). La simbología es la misma de la Figura 33.**



**Figura 35: Diagrama AFM. Curva azul limita la serie calcoalcalina de la serie toleítica (Irvine y Baragar, 1971), curva roja limita la serie calcoalcalina de la serie toleítica (Kuno, 1968). La simbología es la misma que la Figura 33.**

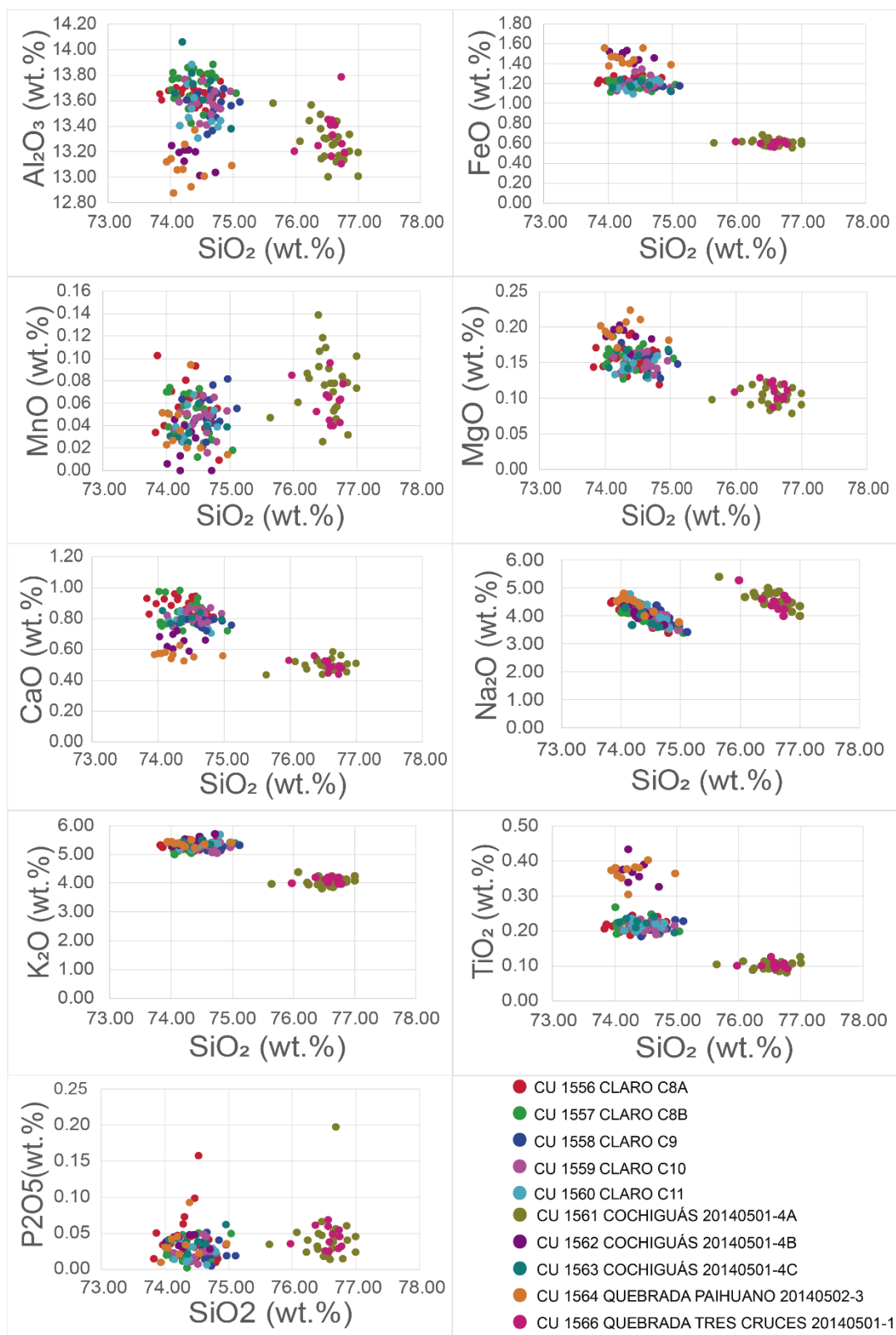
Se utilizó también el diagrama ternario AFM (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O; FeO + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (recalculado como FeO<sub>TOTAL</sub>) y MgO) (Figura 35) para determinar si las muestras pertenecen a la serie toleítica o calcoalcalina. En conjunto fue utilizado el diagrama que utiliza las concentraciones de K<sub>2</sub>O y SiO<sub>2</sub> propuesto por Peccerillo & Taylor, 1976 (Figura 36). El uso de ambos diagramas refleja que todas las muestras presentan afinidades calcoalcalinas de alto K<sub>2</sub>O.





**Figura 36: Diagrama K<sub>2</sub>O versus SiO<sub>2</sub> (Kuno, 1968). La simbología es la misma que la Figura 33.**

Como fue posible observar en las Figuras 33 a 36, se generan dos familias geoquímicas, la primera agrupa muestras de los ríos Claro, Cochiguás y Quebrada Paihuano, mientras que la segunda familia agrupa una muestra del río Cochiguás y otra de la Quebrada Tres Cruces. La primera familia es de mayor álcalis y menos sílice, mientras que la segunda es de mayor sílice y menor álcalis.



**Figura 37: Diagramas de Harker para óxidos de elementos mayores para los depósitos de cenizas de este estudio**

Considerando una agrupación según los sectores de muestreo (ver leyenda Figura 37) se puede observar que los óxidos de Fe, K y Ti no muestran un cambio con respecto al aumento de la sílice. A pesar de lo anterior, si se consideran todas las muestras, se puede notar una tendencia decreciente con respecto al aumento de sílice con una dispersión baja a moderada de los datos (Figura 37). Sin embargo, en el óxido de Na si se considera la agrupación según el sector de muestreo puede ser apreciada una tendencia decreciente con baja dispersión de los datos a medida que aumenta la sílice.

Los óxidos de Al, Mn y P muestran una alta dispersión de los datos que no permite hacer inferencias acerca de un comportamiento en particular con respecto al aumento del contenido de sílice.

## 5. Discusión

### 5.1 Naturaleza de los depósitos.

En esta sección será discutida la naturaleza de los depósitos, interpretando los resultados obtenidos. La ocurrencia de estos depósitos es inusual, debido al ambiente geotectónico que caracteriza al sector estudiado, el cual corresponde a la zona de subducción plana, que no favorece el desarrollo de volcanes en el eje de la alta cordillera.

Debido a que los afloramientos donde se encuentran expuestas las cenizas no presentan estructuras de depósito, sumado al tipo de granulometría, estas podrían asociarse a un depósito de caída piroclástica distal. Sin embargo, junto con estos niveles se encuentran intercalados depósitos coluviales y fragmentos líticos derivados de las rocas circundantes.

La mineralogía presente en los depósitos estudiados podría corresponder a los coluvios, ya que se encuentra más alterada que el vidrio volcánico. La anfíbola y la titanita corresponden a minerales muy densos, que difícilmente habrían sido transportados por flotabilidad hasta ser depositados. La biotita está presente en mayor cantidad en la fracción gruesa que la fracción fina. Las plagioclasas y feldespatos se encuentran parcialmente argilizados y presentan pátinas de sulfuros de cobre, por lo que estos cristales no estarían asociados al evento eruptivo. Para que esto haya ocurrido, las cenizas debieron haber sido depositadas en las partes altas de los paleo valles Claro y Cochiguás y paleo quebradas Paihuano y Tres Cruces, para luego haber sido removilizadas en conjunto con los coluvios hacia las profundidades de los valles y quebradas, donde hoy se encuentran como un depósito mixto.

Con los antecedentes del marco glaciológico, se proponen dos posibles procesos de removilización provocados por:

- Acción de aguas de lluvia contemporáneas o posteriores a la depositación del material piroclástico.

- Acción de aguas de deshielo de glaciares, según las edades obtenidas por Riquelme *et al.* (2011).

## **5.2 Mecanismos eruptivos, naturaleza de la erupción y del magma.**

En esta sección se discutirá sobre los mecanismos eruptivos capaces de generar los depósitos de caída piroclástica distal, naturaleza de la erupción y del magma, y especulación acerca de la magnitud de la erupción.

Dentro de los distintos tipos de mecanismos eruptivos, pueden encontrarse los efusivos y los explosivos, siendo este último el que pueda generar depósitos de caída piroclástica distal. Dentro de las erupciones explosivas, se encuentran las de tipo plinianas, las cuales se producen en su totalidad por erupciones de volcanes de composición riolítica y se caracterizan por generar plumas de gran altura resultando en inyección de cenizas en la atmósfera y dispersión de estas por vientos dominantes sobre áreas extensas, disminuyendo su diámetro a medida que se aleja del centro emisor (Sigurdsson *et al.*, 2000). Con respecto a los depósitos de las cenizas volcánicas estudiadas en este trabajo, al presentar una granulometría muy fina podrían asociarse a un depósito distal proveniente de una erupción del tipo pliniana.

La naturaleza de la erupción puede determinarse a partir de la morfología de vidrio observada. Según las interpretaciones de Cas & Wright (1998), la erupción habría sido explosiva a partir de un magma silíceo. La ocurrencia de esquirlas de vidrio planas se encuentra asociada a una interacción magma-agua externa, que podría corresponder a vapor de agua. Las partículas blocosas se atribuyen a un comportamiento dúctil del magma, el cual habría favorecido la formación de fragmentos más irregulares durante el enfriamiento y solidificación.

Según los criterios de Sigurdsson *et al.* (2000), la erupción debería haber sido violenta debido a la presencia de pequeñas pómez y esquirlas de vidrio más pequeñas. Las esquirlas tipo “bubble-shard” indicarían que correspondería a una erupción magmática rica en gas (Fischer y Schminke [1984] clasifican una erupción

magmática rica en gas con depósitos de caída de ceniza a partir de un magma viscoso como una erupción pliniana). Sumado a esto, las esquirlas planas indican que la erupción sería pobre en gas, o que quizás el magma interactuó con aguas subterráneas, fragmentando el magma antes de que ocurriera un crecimiento de burbujas, correspondiendo a una erupción del tipo freatomagmática.

Esto podría indicar un cambio en la física de la erupción, variando de una erupción pliniana a una freatomagmática, sin embargo, no es posible determinar con certeza cual corresponde a la inicial y tampoco el tiempo de duración de cada una. Esto pudo haber ocurrido por un contacto entre fluidos freáticos y magma, provocando un aumento en la intensidad de la erupción. Otra posibilidad es la descompresión explosiva del sistema hidrotermal asociado con un reservorio de magma poco profundo.

### **5.3 Comparación geoquímica con depósitos asociados al Campo Volcánico Pocho y al evento eruptivo Caldera El Diamante.**

Para efectos comparativos, se utilizarán los datos geoquímicos de depósitos asociados al Campo Volcánico Pocho y al evento eruptivo Caldera El Diamante. El primero se encuentra en el segmento de subducción plana, con dos episodios eruptivos, uno hace 7.5 Ma y otro hace 5.3 Ma aproximadamente (Kay y Gordillo, 1984), y el segundo corresponde a una erupción de gran magnitud que evacuó aproximadamente 250 km<sup>3</sup> de flujos ignimbríticos (Guerstein, 1990). La tabla resumen con los datos geoquímicos se encuentran en el Anexo IV.

El Campo Volcánico Pocho se ubica a 700km de la fosa, en el centro del segmento de subducción plana (32°S), en la parte occidental de la Sierra de Córdoba. Este estuvo activo desde los 7.9 hasta 4.5 Ma (Gordillo y Linares, 1982). El volcanismo en Pocho comienza cuando ocurre el cambio de la deformación, migración de la actividad volcánica hacia el este debido a la somerización de la placa subductante (Kay y Gordillo, 1994), generado por la colisión de la dorsal de Juan Fernández con el continente sudamericano. Está compuesto por rocas

piroclásticas y volcánicas de edad miocena, en la que se pueden dividir en una serie antigua ( $7.5 \pm 0.5$  Ma) con afinidad calcoalcalina de alto potasio y una serie shoshonítica más joven ( $5.3 \pm 0.7$  Ma) (Figura 41).

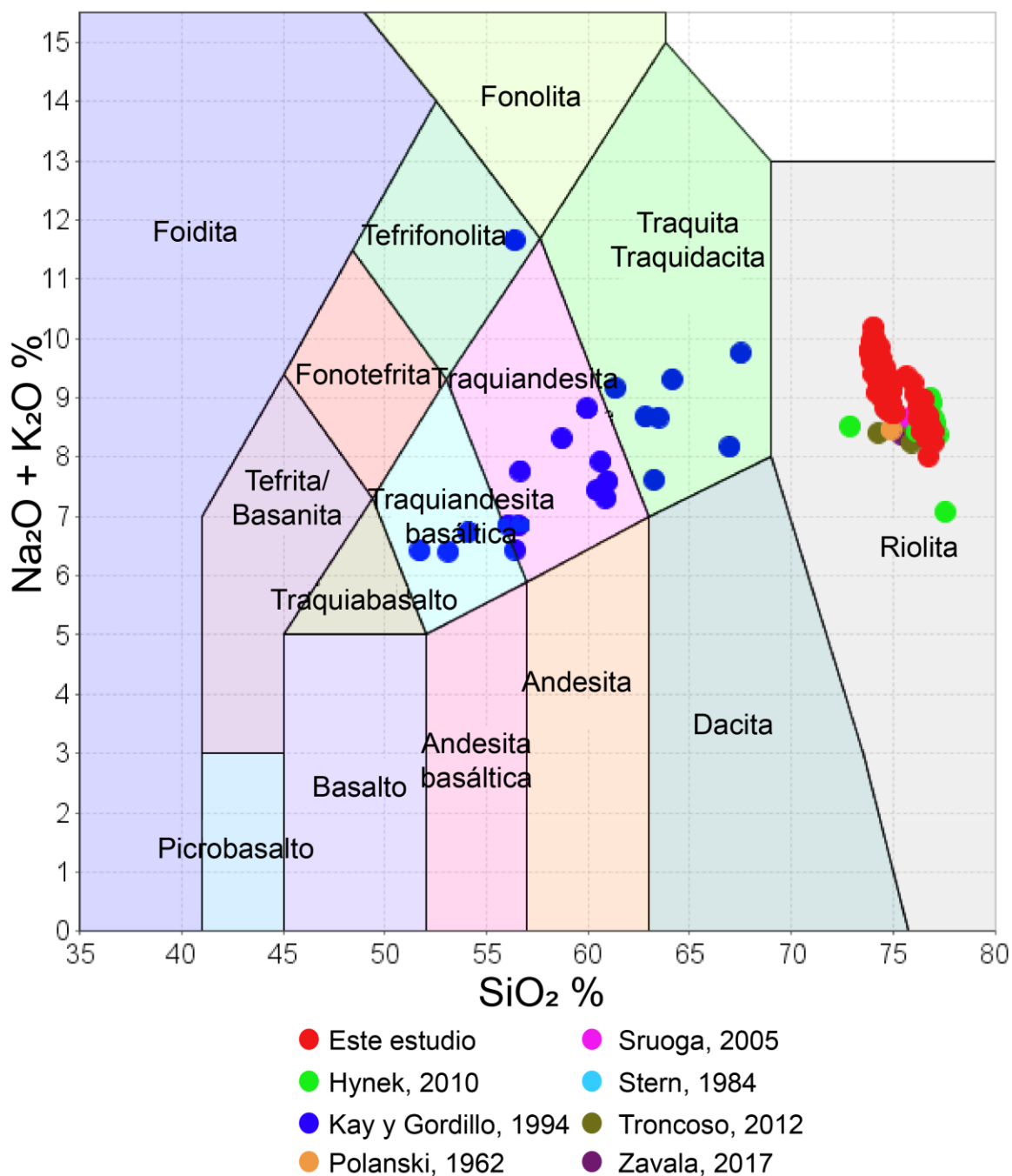
El complejo eruptivo Caldera Diamante Volcán Maipo (CCDVM) se halla situado en los Andes argentino-chilenos ( $34^{\circ} 10' S$ ,  $69^{\circ} 50' O$ ), en el extremo norte de la Zona Volcánica Sur (Stern *et al.*, 2004), a 470 km aproximadamente de la zona de estudio. La generación de la caldera se vincula a la evacuación de  $250 \text{ km}^3$  de flujos ignimbríticos (Guerstein, 1990). De acuerdo a Guerstein (1993), la Asociación Piroclástica Pumícea (Polanski, 1963) se integra por tres unidades: dos de caída pliniana y una de flujo piroclástico denso.

Es posible observar que el Campo Volcánico Pocho está asociado a una serie magmática que es en general alcalina (Figura 39), pero como se puede notar en la Figura 41, existe una serie calcoalcalina de alto potasio, correspondiente a la unidad más antigua y una serie shoshonítica de edad más joven. Así, no se descarta la posibilidad de correlacionarla con los depósitos estudiados en este trabajo, debido a que las cenizas de este estudio podrían ser nuevos depósitos asociados al Campo Volcánico Pocho.

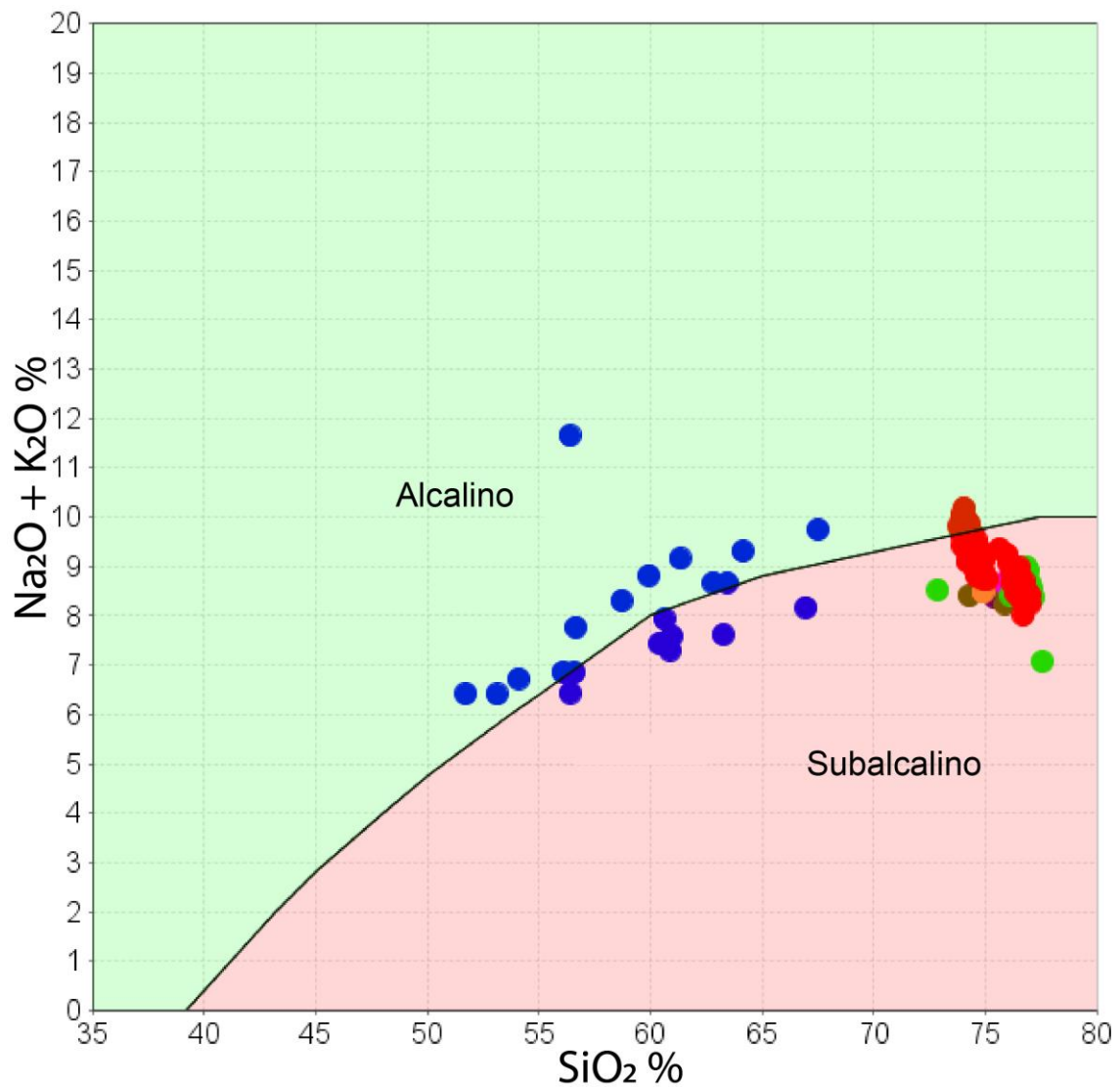
Antinao *et al.* (2015) han asociado estos depósitos al evento eruptivo Caldera El Diamante, ya que como se puede observar existe una correlación del grupo de muestras con mayor contenido de sílice de este trabajo con los depósitos mencionados (Figuras 38-41), presentando similitudes en la composición riolítica y en la afinidad con la serie magmática calcoalcalina de alto potasio (volcanismo de arco). Además, las edades del evento eruptivo Caldera El Diamante se encuentran en un rango de edades recientes, variando entre 450 ka (Stern, 1984) y 150 ka (Lara *et al.*, 2008). Lo que es correlacionable a la edad obtenida por Antinao *et al.* (2015) para los depósitos de cenizas mediante Luminiscencia Infrarroja de Feldespato, arrojando edades de al menos 30 ka. La magnitud de la erupción que generó los depósitos corresponde a una del tipo pliniano, que es el interpretado para haber generado los depósitos estudiados, estos podrían haber sido transportados 470 km aproximadamente para depositarse en el área de estudio. A pesar de esto, no es

posible realizar una asignación de los depósitos de este estudio a esa proveniencia, ya que para esto se necesitan análisis geoquímicos de elementos traza, con los cuales no se cuentan en este trabajo.

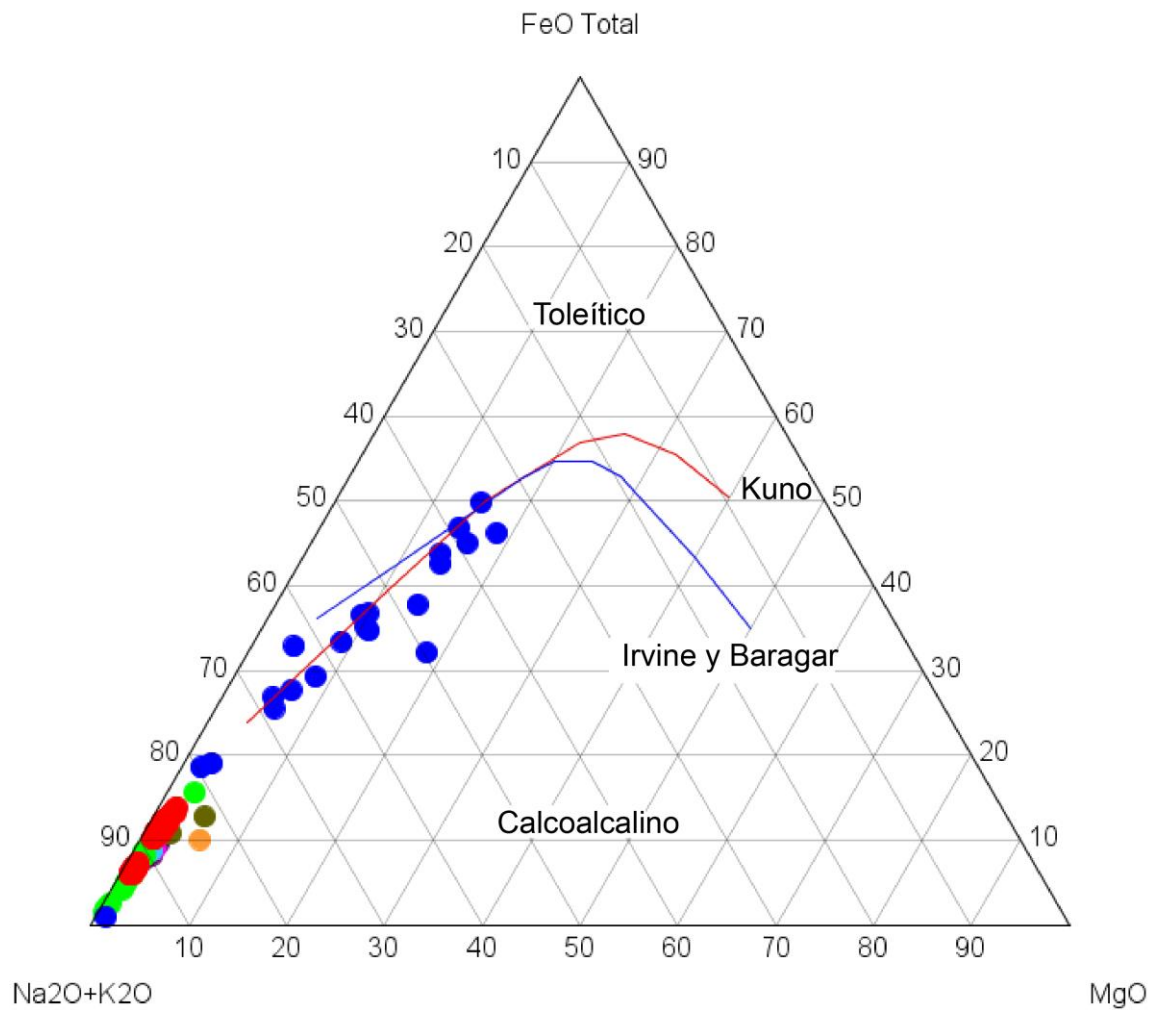




**Figura 38: Diagrama TAS (Total álcalis vs sílice) (Le Bas et al., 1986). Se exponen las muestras analizadas en este trabajo, el trabajo de Kay y Gordillo (1994) corresponde al Campo Volcánico Pocho, y los demás autores corresponden a estudios en los depósitos piroclásticos asociados al evento eruptivo Caldera El Diamante.**



**Figura 39: Diagrama de las series magmáticas alcalina y subalcalina propuesto por Irvine & Baragar (1971). La simbología es la misma de la Figura 38.**



**Figura 40: Diagrama AFM. Curva azul limita la serie calcoalcalina de la serie toleítica (Irvine y Baragar, 1971), curva roja limita la serie calcoalcalina de la serie toleítica (Kuno, 1968). La simbología es la misma que la Figura 38.**

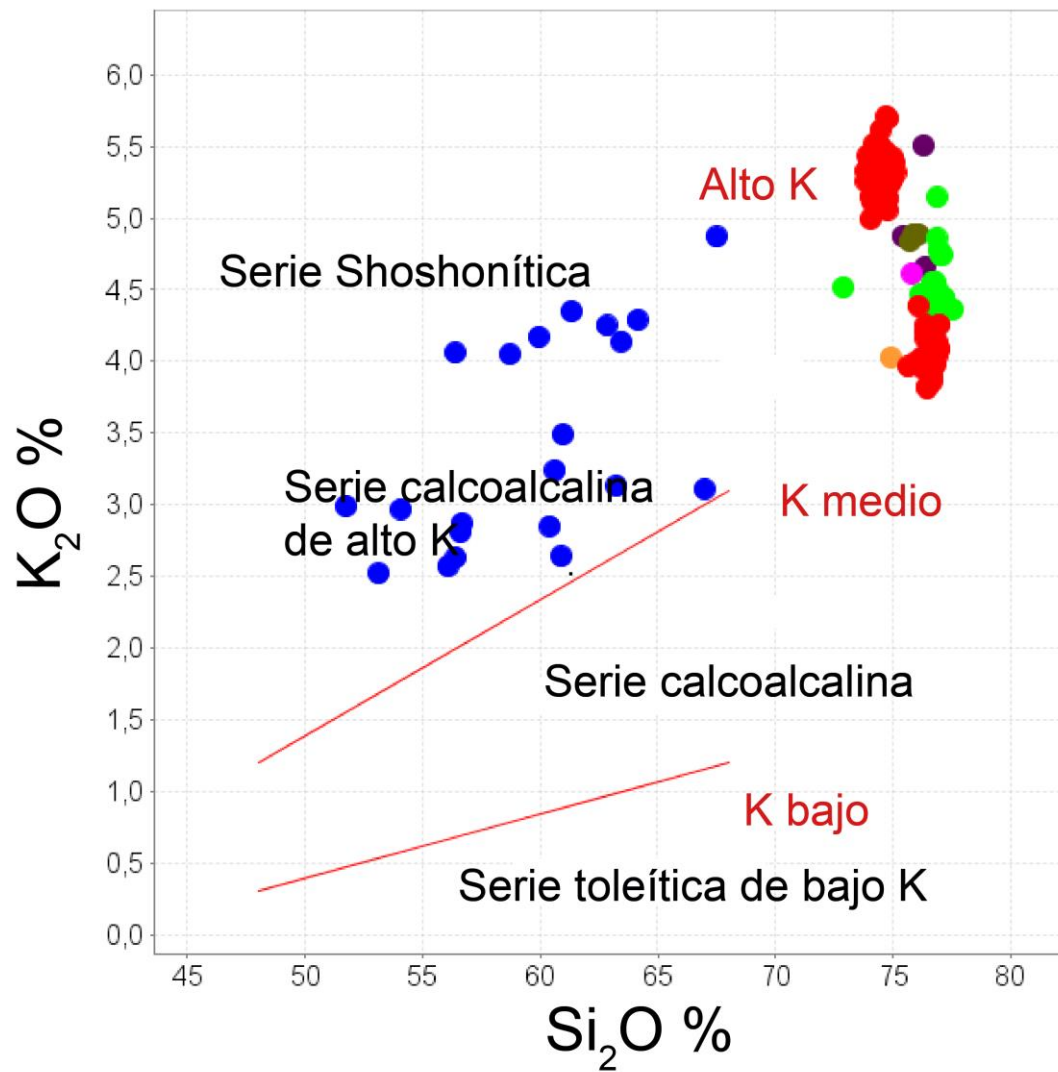


Figura 41: Diagrama K<sub>2</sub>O versus SiO<sub>2</sub> (Kuno, 1968). La simbología es la misma que la Figura 38.

## 6.Conclusiones

De acuerdo al análisis realizado de los datos obtenidos, se concluye lo siguiente:

- Los depósitos de cenizas encontrados en los valles de los ríos Claro y Cochiguás, y en las quebradas Tres Cruces y Paihuano corresponden a depósitos mixtos, generados por la removilización de un depósito de caída piroclástica distal del centro emisor, provocados por (i) acción de aguas de lluvia contemporáneas o posteriores a la depositación de las cenizas volcánicas, y (ii) acción de aguas de deshielo de glaciares, según las edades obtenidas por Riquelme *et al.* (2011).
- La erupción que pudo generar estos depósitos es variable entre pliniana y freatomagmática, la variación es desconocida y solo es posible de interpretar debido a la morfología de vidrio observada.
- No se descarta una posible correlación entre la geoquímica del Campo Volcánico Pocho y los depósitos estudiados en este trabajo, debido a que pueden ser depósitos no reconocidos de este. El origen de las cenizas se asocia a un volcanismo de arco calcoalcalino y se pueden correlacionar con los depósitos asociados al evento eruptivo Caldera El Diamante según rasgos en común con los depósitos reconocidos de este. Por lo que, es posible que la pluma de cenizas generada por el evento mencionado haya sido transportada 470 km al norte para luego generar depósitos de caída en el área de estudio.
- Las limitaciones del estudio están en que, si bien, se logró una caracterización detallada de los depósitos, en cuanto a granulometría, mineralogía, geoquímica de elementos mayores y morfología juvenil, falta información de la geoquímica de los elementos menores y una nueva datación para que una correlación pueda ser realizada de manera precisa.

# Referencias

- Aguilar G., Riquelme R., Martinod J., Darrozes J., Maire E. 2011. Erosion rates variability on landscape's transience state in the semiarid Chilean Andes. *Earth Surface Processes and Landforms* 36: 1736-1748.
- Aguilar, G., Riquelme, R., Martinod, J., Darrozes, J. 2013. Rol del clima y la tectónica en la evolución geomorfológica de los Andes Semiáridos chilenos entre los 27-32°S. *Andean Geology* 40 (1): 79-101.
- Ammann, C.; Jenny, B.; Kammer, K.; Messerli, B. 2001. Late Quaternary Glacier response to humidity changes in the arid Andes of Chile (18-29°S). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 172: 313-326.
- Anderson A.T. 1976. Magma mixing: petrological process and volcanological tool. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 1: 33-33
- Antinao J., McDonald E., Maldonado A., Negrini R., Tiner R., Bobbit M., Santibáñez I., Kuehn S. 2015. Nuevos antecedentes geocronológicos y estratigráficos en el Cuaternario del valle del Elqui, Chile. XIV Congreso Geológico Chileno La Serena.
- Bachman O., Bergantz G.W. 2003 Rejuvenation of the Fish Canyon magma body: A window into the evolution of large-volume silicic magma systems. *Geology* 31: 789-792.
- Barazangi, M., Isacks, B.L., 1976. Spatial distribution of earthquakes and subduction of the Nazca plate beneath South America: *Geology*, Vol. 4: 686-692.
- Brüggen J. 1928. La glaciación actual y cuaternaria de la Cordillera de los Andes. *Anales de la Universidad de Chile*, 2ª. Ser., Tom. 6, No. 3: 599-684.
- Cashman K., Rust A. 2016. Volcanic Ash: generation and spatial variations. School of Earth Sciences, University of Bristol, Bristol, United Kingdom.

- Cas R.A.F. & Wright J.V. 1998. Volcanic Successions Modern and Ancient, A geological approach to processes, products and successions. First Edition. London.
- Caviedes C. & Paskoff R. 1975. Quaternary glaciations in the andes of north-central Chile. *Journal of Geology*, Vol. 14. No. 70: 155 – 170.
- Cembrano J., Zentilli M., Grist A., Yáñez G. 2003. Nuevas edades de trazas de fisión para Chile Central (30°-34°S): Implicancias en el alzamiento y exhumación de los Andes desde el Cretácico. In Congreso Geológico Chileno, No. 10, CD Rom. Concepción.
- Charrier R., Vicente J.C. 1972. Liminary and geosyncline Andes: major orogenic phases and synchronical evolutions of the central and Magellan sectors of the Argentine Chilean Andes. Solid Earth Problems Conference, Upper Mantle Project, Buenos Aires, 1970, 2: 451–470.
- Charrier R., Bustamante M., Comte D., Elgueta S., Flynn, J.J., Iturra N., Muñoz N., Pardo M., Thiele R., Wyss A.R. 2005. The Abanico Extensional Basin: Regional extension, chronology of tectonic inversion, and relation to shallow seismic activity and Andean uplift. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie Abh.* 236 (1-2): 43-77.
- Charrier, R., Pinto, L., Rodríguez, M.P., 2007. Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. Chapter 3. *The Geology of Chile*. The Geological London Society, London: 21-114.
- Charrier R., Farías M., Maksaev V. 2009. Evolución tectónica, paleogeográfica y metalogénica durante el Cenozoico en los Andes de Chile norte y central e implicaciones para las regiones adyacentes de Bolivia y Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, versión 65 No.1, Buenos Aires.
- Coira B., Davidson C., Mpodozis C., and Ramos, V. 1982. Tectonic and magmatic evolution of the Andes of northern Argentina and Chile. *Earth-Science Reviews*, Special Issue, 18: 303–332.

- Cornejo P., Matthews S. and Pérez C. 2003. The "K-T" compressive deformation event in northern Chile (24°-27°S). 10º Congreso Geológico Chileno (Concepción), CD Rom.
- Davis M., Koenders M.A., Petford N. 2007. Vibro-agitation of chambered magma. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 167: 24-36.
- Dedios P., 1967. Cuadrángulo Vicuña, Provincia de Coquimbo, Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile, No. 16, 65p.
- Eichelberger J.C., Izbekob P.E. 2000. Eruption of andesite triggered by dyke injection: contrasting cases at Karymsky Volcano, Kamchatka and Mt. Katmai, Alaska. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 358: 1465-1485.
- Engwell S. & Eychenne J. 2016. Contribution of Fine Ash to the Atmosphere From Plumes Associated With Pyroclastic Density Currents. In: Mackie S., Cashman K., Ricketts, H., Rust A., Watson M. (Eds.), *Volcanic Ash: Hazard Observation*. Elsevier: 67–85.
- Farías M., 2007. Tectónica y erosión en la evolución del relieve de los Andes de Chile Central durante el Neógeno. Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias, mención Geología. Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Fisher R.V. & Schmincke H.U. 1984. *Pyroclastic Rocks*. Springer – Verlag Berlin Heidelberg.
- Gómez P., 2015. Correlaciones entre espectrometría de reflectancia, geoquímica y mineralogía de sedimentos fluviales de la cuenca del Río Elqui, IV Región, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo, Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago.
- Gordillo C.E. y Linares E. 1982. Geocronología y petrografía de las vulcanitas Terciarias del departamento Pocho, provincia de Córdoba. *Revista de Asociación Geológica Argentina* 36: 380-388.



- Groeber P. 1951. La Alta Cordillera entre las latitudes 34° y 29°30'. Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales Bernardino Rivadavia, Ciencias Geológicas 1(5): 235-352.
- Guerstein P. 1990. Volume estimation of pyroclastic flow deposits through specific area of accumulation. An andean example. International Volcanology Congress (Mainz).
- Guerstein P. 1993. Origen y significado geológico de la Asociación Piroclástica Pumícea. Pleistoceno de la provincia de Mendoza entre los 33°83'00" y 34°84'00" L.S. Tesis. Universidad Nacional de La Plata, La Plata.
- Hervé, F., Fanning, C.M., Calderón, M. Mpodozis, C. 2014. Early Permian to Late Triassic batholiths of the Chilean Frontal Cordillera (28°-31°S): SHRIMP U-Pb zircon ages and Lu-Hf and O isotope systematics. Lithos 184-187, 436-446.
- Holdreth W., Mahood G.A. 1986. Ring-fracture eruption of the Bishop Tuff. Geological Society of America Bulletin 97: 396-403.
- Hynek, S. A., Marchetti, D. W., Fernandez, D. P., & Cerling, T. E. (2010). Composition, pre-eruptive zonation, and geochronologic significance of the ~450ka Diamante Tuff, Andean Cordillera (34° S), Argentina. Quaternary Geochronology, 5(5): 591-601.
- Irvine, T. N. J., & Baragar, W. R. A. F. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. Canadian journal of earth sciences, 8(5): 523-548.
- Kay S.M. & Gordillo C.E. 1994. Pocho volcanic rocks and the melting of depleted continental lithosphere above a shallowly dipping subduction zone in the central Andes. Springer – Verlag, Contribution Mineral Petrol 177: 25-44.
- Kuno, H. 1968. Differentiation of basalt magmas. Basalts, 2(3): 623-688.

- Lara L., Wall R., Stockli D. 2008. La Ignimbrita Pudahuel (Asociación Piroclástica Pumícea) y la caldera Diamante (35°S): Nuevas edades U-Th-He. 17° Congreso Geológico Argentino. Actas CD: 1365, San Salvador de Jujuy.
- Le Bas, M. J., Le Maitre, R. W., Streckeisen, A., & Zanettin, B. (1986). A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of petrology*, 27(3): 745-750.
- Letelier M. 1977. Petrología, ambiente de depositación y estructura de las formaciones Matahuaico, Las Breas, Tres Cruces *sensu lato* e intrusivos hipabisales permotriásicos, en el área de Rivadavia-Alcohuás, valle del Elqui, IV Región, Chile. Memoria de Título (inédito). Universidad de Chile, Departamento de Geología, 131 p. Santiago.
- Lipman P.W. (1997) Subsidence of ash flows calderas: relation to caldera size and magma-chamber geometry. *Bulletin of Volcanology* 59: 198-218
- Maksaev V., Munizaga F., Valencia V. and Barra F. 2009. LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology to constrain the age of post-Neocomian continental deposits of the Cerrillos Formation, Atacama Region, northern Chile: Tectonic and metallogenic implications: *Andean Geology*, Vol. 36: 264-287.
- Martínez F., Arriagada C., Peña M., Del Real I., Deckart K. 2013. The structure of the Chañarcillo Basin: An example of tectonic inversion in the Atacama region, northern Chile, *Journal of South American Earth Sciences*, Vol. 42:1-16.
- Miller C., Wark D., 2008. Supervolcanoes and their explosive supereruptions. *Elements*, Vol. 4: 11-16.
- Mortensen H. 1972. Chilean glacial chronology 20,000 to 11,000-14 years ago: some global comparisons. *Science*, Vol. 176, No. 4039: 1118-20.
- Mourgues F.A. 2007. Paléontologie stratigraphique (Ammonites) et évolution tectonosédimentaire du bassin d'arrière arc de Chañarcillo (Berriasien-Albien, Nord du Chili). PhD Thesis, University of Toulouse III, France.

- Mpodozis C., 1974. Geología de la Cordillera de Ovalle, provincia de Coquimbo, entre los 30°-20° y 30°-55°S. Memoria de Título (inédito). Universidad de Chile, Departamento de Geología, 191 p. Santiago, Chile.
- Mpodozis C., Rivano S., 1976. Evidencias de tectogénesis en la Alta Cordillera de Ovalle (Provincia de Coquimbo). Congreso Geológico Chileno No I, Santiago, Actas, Vol. 1: B57-B67
- Mpodozis C., Cornejo P. Hoja Pisco Elqui, IV Región de Coquimbo, Chile. Carta Geológica de Chile No. 68, Servicio Nacional de Geología y Minería, escala 1:250.000.
- Nasi C., Mpodozis C., Cornejo P., Moscoso R., Makshev V. 1985. El Batolito Elqui-Limarí (Paleozoico Superior-Triásico): Características petrográficas, geoquímicas y significado tectónico. Revista Geológica de Chile, No. 25-26: 77-111
- Pallister J.S., Hoblitt R.P., Reyes A.G. 1992. A basalt trigger for the 1991 eruptions of Plinatus volcano? Nature 356: 426-428.
- Parada M.A., Munizaga F., Kawashita K., 1981. Edades Rb-Sr roca total del Batolito Compuesto de los ríos Elqui-Limarí en la latitud 30°S. Revista Geológica de Chile, No. 13-14: 87-93.
- Parada M.A., 1982. Petrology of the Lower Triassic anorogenic granites in the High Andes (30°S), Chile. Unpublished Ph. D. Thesis. Tohoku University, 165 p. Japan.
- Pardo-Casas F., Molnar P. 1987. Relative motion of the Nazca (Farallon) and South American plates since Late Cretaceous time: Tectonics 6: 233-248
- Pardo M., Comte D., Monfret T. 2002. Seismotectonic and stress distribution in the central Chile subduction zone. Journal of South American Earth Sciences, Vol. 15, Issue 1: 11-22.

- Paskoff R. 1967. Los cambios climáticos Plio-Cuaternarios en la franja costera de Chile semiárido. Boletín de la Asociación de Geógrafos de Chile, Tom, 1, No. I: 11-13.
- Paskoff R. 1970. Recherches géomorphologiques dans la Chili semi-aride. Bordeaux, Biscaye Freres.
- Paskoff R. 1972. Formes de glaciation résiduelle dans la cordillere de l'Elqui (province de Coquimbo, Chili). Photo-interpretation, [No.] 3: 8-13.
- Peccerillo, A. & Taylor, S.R. 1976. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. Contributions to Mineralogy and Petrology, 58: 63-81.
- Pedro J. B., van Ommen T.D., Rasmussen S.O., Morgan V.I., Chappellaz J., Moy A.D., Masson-Delmotte V., Delmotte M. 2011. The last deglaciation: timing the bipolar seesaw. Climate of the Past Discussions, 7: 397–430.
- Pilger R. H. 1984. Cenozoic plate kinematics, subduction and magmatism: South American Andes. Journal of the Geological Society. 141 No. 5: 793-802.
- Polanski J. 1953. Calderas del cerro El Pozo (Departamento de San Carlos, Provincia de Mendoza). Revista de la Asociación Geológica Argentina No. 8: 54-59.
- Polanski J. 1963. Estratigrafía, neotectónica y geomorfología del Pleistoceno pedemontado entre los ríos Diamante y Mendoza (provincia de Mendoza). Revista de la Asociación Geológica Argentina 17: 127-349.
- Polanski J. 1964. Descripción geológica de la Hoja 26c, La Tosca. Dirección Nacional de Geología y Minería, Boletín 101, 50 p., Buenos Aires.
- Ramos A. Victor, Cristallini E.O., Pérez J. Daniel. 2002. The Pampean flat-slab of the Central Andes. Journal of South American Earth Sciences 15 (2002): 59-78.

- Reutter K. J. 2001. Le Ande centrali: elemento di un'orogenesi di margine continentale attivo. *Acta Naturalia de l'Ateneo Parmense*, 37(1/2): 5–37.
- Ribba L.P., 1985. Geología Regional del Cuadrángulo El Tránsito, Región de Atacama, Chile. Memoria de Título (inédito). Universidad de Chile, Departamento de Geología y Geofísica, 203 p. Santiago.
- Riquelme R., Martinod J., Hérail G. Darrozes J., Charrier R. 2003. A geomorphological approach to determining the Neogene to Recent tectonic deformation in the Coastal Cordillera of northern Chile (Atacama). *Tectonophysics* 361: 255-275.
- Rivano S., 1975. Reconocimiento geológico de las nacientes del río Grande (Alta Cordillera de Ovalle, entre los 30°50' y 31°20'S, provincia de Coquimbo). Memoria de Título (inédito). Universidad de Chile, Departamento de Geología, 214p. Santiago.
- Salazar, E. 2012. Evolución Tectonoestratigráfica Post-Paleozoica de la Cordillera de Vallenar. Tesis de Magister. Universidad de Chile.
- Schneider H. 1969. El clima del Norte Chico, Santiago de Chile, Departamento de Geografía de la Universidad de Chile.
- Sigurdsson H., Houghton B., McNutt S., Rymer H., Stix J. 2000. *Encyclopedia of Volcanoes*. 2nd Edition.
- Sparks R.S.J., Bursik M.I., Carey S.N., Gilbert J.S, Glaze L.S., Sigurdsson H., Woods A.W. 1997. *Volcanic Plumes*. John Wiley & Sons, Chichester, UK, 590pp.
- Sruoga P., Llambías E., Fauqué L., Schonwandt D., Repol D. 2005 Volcanological and geochemical evolution of the Diamante Caldera–Maipo volcano complex in the southern Andes of Argentina (34°10'S). *Journal of American Earth Sciences* No. 19: 399-414.

- Sruoga P., Etcheverria M., Feineman M., Rosas M., Burkert C., Ibáñez O. 2012. Complejo Caldera Diamante – Volcán Maipo (34°10'S, 69°50'O): Evolución volcanológica y geoquímica e implicancias en su peligrosidad.
- Stauder W. 1973. Mechanism and spatial distribution of Chilean earthquakes with relation to subduction of the oceanic plate. *Journal of Geophysical Research* No. 78: 5033-5061.
- Steinmann G. 1929. *Geologie von Peru*. Kart Winter, Heidelberg.
- Stern C.R., Amini H., Charrier R., Godoy E., Hervé F., and Varela J. 1984. Petrochemistry and age of rhyolitic pyroclastic flows which occur along the drainage valleys of the río Maipo and río Cachapoal (Chile) and the río Yaucha and río Papagayos (Argentina). *Revista Geológica de Chile* 23: 39-52.
- Somoza R. 1998. Updated Nazca (Farallon) – South America relative motions during the last 40 My: implications for mountain building in the central Andean region. *Journal of South American Earth Science*, No 11: 211-215.
- Troncoso, C. 2012. Estudio estratigráfico y de volcanología física de la ignimbrita Pudahuel. Memoria para optar al título de geóloga. Universidad de Chile, 84p. Santiago
- Vicente J. C., Charrier R., Davidson J., Mpodozis A. C., and Rivano S. 1973. La Orogénesis Subhercínica: Fase mayor de la evolución paleogeográfica y estructural de los Andes Argentino Chilenos centrales. 5th Congreso Geológico Argentino, Buenos Aires, 5: 81–98
- Walter T.R., Amelung F. 2007. Volcanic eruptions following  $M \geq 9$  megathrust earthquakes: Implications for the Sumatra-Andaman volcanoes. *Geology* 35: 539-542.
- Weischet W. 1969. Zur Geomorphologie des Glatthangreliefs in der ariden Subtropenzone des Kleinen Nordens von Chile. *Zeitschrift für Geomorphologie*, Neue Folge, Bd. 13, Ht, I: 1-21.

- Wilson C. 2008. Supereruptions and Supervolcanoes: Processes and Products. Elements Vol. 4: 30-34.
- Yáñez G., Ranero C., Von Huene R., Díaz J. 2001. Magnetic anomaly interpretation across the southern central Andes (32°-34°S): The role of the Juan Fernandez Ridge in the late Tertiary evolution of the margin. Journal of Geophysical Research 106 (B4): 6325-6345.
- Yrigoyen M. 1993. Los depósitos sinorogénicos terciarios. En Ramos, V.A. (ed.) Geología y Recursos Naturales de Mendoza, 12º Congreso Geológico Argentino y 2º Congreso de Exploración de Exploración de Hidrocarburos (Mendoza), Relatorio 1: 123-148
- Zavala A. 2017. Evolución Temporal e Historia Eruptiva de la Ignimbrita Pudahuel. Tesis para optar al título de geólogo. Universidad Andrés Bello, Facultad de Ingeniería. 148p. Santiago.

# ANEXO I

A continuación, se exponen tablas resumen de las fases minerales obtenidas mediante la evaluación en el *software* Difracc Suite EVA, en cada muestra analizada por DRX.

## C1

| Grupo        | Color | Código muestra | Nombre                    | Fórmula   | % (S-C) |
|--------------|-------|----------------|---------------------------|---|---------|
| Plagioclasas |       | COD 9002201    | Albita                    | Al Na O8 Si3                                    | 8,09%   |
|              |       | PDF 89-6426    | Albita (heat-treated)     | Na ( Al Si3 O8 )                                | 10,11%  |
|              |       | PDF 10-0393    | Albita Desordenada        | Na ( Si3 Al ) O8                                | 8,00%   |
|              |       | COD 9001258    | Anortita                  | Al2 Ca O8 Si2                                   | 8,91%   |
|              |       | PDF 41-1486    | Anortita ordenada         | Ca Al2 Si2 O8                                   | 15,03%  |
|              |       | COD 9011423    | Oligoclasa                | Al1.277 Ca0.277 Na0.723 O8 Si2.723              | 7,94%   |
|              |       | COD 9011201    | Bytownita                 | Al7.76 Ca3.44 Na0.56 O32 Si8.24                 | 8,38%   |
|              |       | COD 9000748    | Labradorita               | Al0.814 Ca0.32 Na0.18 O4 Si1.184                | 9,13%   |
| Feldespatos  |       | PDF 78-0433    | Labradorita               | Al0.814 Ca0.32 Na0.18 O4 Si1.184                | 6,32%   |
|              |       | PDF 25-0618    | Sanidina desordenada      | K ( Si3 Al ) O8                                 | 2,98%   |
|              |       | COD 9001103    | Sanidina alta             | Al K O8 Si3                                     | 2,41%   |
| Micas        |       | COD 9000467    | Biotita                   | Al1.999 H2 K Mg2.001 O12 Si3                    | 3,33%   |
|              |       | PDF 42-1437    | Flogopita-1M, férrica     | K ( Mg , Fe )3 ( Al , Fe ) Si3 O10 ( O H , F )2 | 0,80%   |
| SiO2         |       | COD 1011172    | Cuarzo bajo               | O2 Si   | 1,48%   |
| Otros        |       | PDF 52-1344    | Aluminio silicato cálcico | Ca0.88 □0.12 Al1.77 Si2.23 O8                   | 7,09%   |

## C2

| Grupo        | Color | Código muestra          | Nombre                               | Fórmula   | % (S-C) |
|--------------|-------|-------------------------|--------------------------------------|---|---------|
| Plagioclasea |       | COD 9000702/COD 9002198 | Albita                               | Al Na O8 Si3  | 12,68%  |
|              |       | PDF 71-1150             | Albita alta                          | Na ( Al Si3 O8 )  | 7,13%   |
|              |       | PDF 10-0393             | Albita desordenada                   | Na ( Si3 Al ) O8  | 5,09%   |
|              |       | COD 1000034             | Anortita                             | Al2 Ca O8 Si2   | 7,76%   |
|              |       | PDF 41-1486/PDF 12-0301 | Anortita ordenada                    | Ca Al2 Si2 O8   | 16,26%  |
|              |       | PDF 20-0528             | Anortita sódica ordenada             | ( Ca , Na ) ( Al , Si )2 Si2 O8   | 4,77%   |
|              |       | PDF 79-1254             | Andesina no estructurada             | ( Ca0.38 Na.62 ) ( Al1.38 Si2.62 O8 )   | 13,10%  |
|              |       | PDF 78-0433             | Labradorita                          | Na0.45 Ca0.55 Al1.55 Si2.45 O8  | 7,52%   |
|              |       | COD 9000748             | Labradorita                          | Al0.814 Ca0.32 Na0.18 O4 Si1.184  | 6,63%   |
|              |       | COD 9000162             | Ortoclasa                            | Al K O8 Si3   | 2,65%   |
| Feldespatos  |       | COD 9004247             | Sanidina                             | Al K O8 Si3   | 2,86%   |
|              |       | PDF 25-0618             | Sanidina desordenada                 | K ( Si3 Al ) O8   | 3,01%   |
|              |       | COD 9001349             | Biotita                              | Al1.282 Ca0.013 Cr0.072 Fe0.504 K0.955 Mg1.899 Mn0.027 Na0.03 O12 Si2.868 Ti0.324 | 1,38%   |
| Micas        |       | COD 9000009             | Vermiculita                          | H2 Mg3 O12 Si4  | 0,08%   |
|              |       | COD 9001581             | Cristobalita                         | O2 Si   | 0,62%   |
| Otros        |       | PDF 76-0766             | Silicato de calcio, sodio y aluminio | Ca0.8 Na0.2 Al1.8 Si2.2 O8  | 8,43%   |
|              |       | COD 1011261             | Zircón                               | O4 Si Zr  | 0,14%   |



### C3

| Grupo       | Color | Código muestra          | Nombre                                | Fórmula   | S-Q         |
|-------------|-------|-------------------------|---------------------------------------|---|-------------|
| Plagioclasa |       | PDF 70-3752             | Albita                                | ( Na0.98 Ca0.02 ) ( Al1.02 Si2.98 O8 )            | 13,24%      |
|             |       | COD 9000525             | Albita                                | Al Na O8 Si3                                      | 6,89%       |
|             |       | COD 9009663             | Albita                                | Al1.02 Ca0.02 Na0.98 O8 Si2.98                    | 13,83%      |
|             |       | PDF 10-0393             | Albita desordenada                    | Na ( Si3 Al ) O8                                  | 3,45%       |
|             |       | COD 1000034             | Anortita                              | Al2 Ca O8 Si2                                     | 9,99%       |
|             |       | PDF 41-1481             | Anortita sódica desordenada           | ( Ca , Na ) ( Si , Al )4 O8                       | 9,38%       |
| Feldespatos |       | PDF 18-1202             | Anortita sódica intermedia            | ( Ca , Na ) ( Si , Al )4 O8                       | 5,34%       |
|             |       | COD 1011205             | Ortoclasa                             | Al K O8 Si3                                       | 2,77%       |
|             |       | PDF 25-0618             | Sanidina desordenada                  | K ( Si3 Al ) O8                                   | 2,58%       |
| Micas       |       | COD 9000468             | Biotita                               | Al1.999 K0.5 Mg2.001 O12 Si3                      | 2,28%       |
|             |       | COD 9010170             | Flogopita                             | Al1.2 Fe1.11 K0.93 Mg1.5 Na0.07 O12 Si2.8 Ti0.39  | 1,44%       |
| SiO2        |       | COD 1011097/PDF 65-0466 | Cuarzo bajo                           | Si O2   | 1,17%/1,32% |
|             |       | PDF 29-0085             | Óxido de sílice                       | Si O2   | 11,02%      |
| Otros       |       | PDF 85-2210             | Sulfato de calcio y óxido de aluminio | Ca4 ( Al6 O12 ) ( S O4 )                          | 2,72%       |
|             |       | PDF 20-0866             | Sulfato de calcio, potasio y magnesio | K2 Ca Mg ( S O4 )3                                | 0,72%       |
|             |       | PDF 52-1344             | Aluminio silicato cálcico             | Ca0.88 □0.12 Al1.77 Si2.23 O8                     | 5,28%       |
|             |       | PDF 20-0452             | Gismondino                            | Ca Al2 Si2 O8 · 4 H2 O                            | 4,41%       |
|             |       | PDF 46-1264             | Afganita                              | ( Na , Ca , K )8 ( Si , Al )12 O24 ( S O4 , Cl )3 | 2,18%       |

### C4

| Grupo        | Color | Código muestra | Nombre  | Fórmula  | S-Q    |
|--------------|-------|----------------|---|--|--------|
| Plagioclasas |       | PDF 10-0393    | Albita desordenada                              | Na ( Si3 Al ) O8   | 23,38% |
|              |       | COD 9001258    | Anortita  | Al2 Ca O8 Si2  | 16,17% |
|              |       | PDF 41-1481    | Anortita sódica desordenada                     | ( Ca , Na ) ( Si , Al )4 O8  | 22,86% |
| Feldespatos  |       | COD 9004244    | Sanidina  | Al K O8 Si3  | 3,33%  |
|              |       | COD 9000701    | Microclina                                      | Al K O8 Si3  | 4,39%  |
| Micas        |       | COD 9002315    | Anrita  | Al3.448 Fe3 K0.99 Na0.01 O12 Si2.552   | 0,09%  |
|              |       | COD 9000025    | Biotita   | Al F H K Mg3 O11 Si3   | 2,37%  |
|              |       | PDF 42-1437    | Flogopita-1M, férrica                           | K ( Mg , Fe )3 ( Al , Fe ) Si3 O10 ( O H , F )2                                    | 0,52%  |
|              |       | PDF 77-0022    | Vermiculita 2M                                  | ( Mg2.36 Fe0.48 Al0.16 ) Mg0.32 ( Al1.28 Si2.72 ) O10 ( O H )2 ( H2 O )4.32 Mg0.32 | 0,11%  |
| SiO2         |       | COD 1011176    | Cuarzo bajo                                     | O2 Si  | 0,88%  |
|              |       | COD 9006285    | SiO2  | O2 Si  | 0,65%  |
| Otros        |       | PDF 71-0936    | Silicato de calcio y aluminio hidratado         | Ca40 Al80 Si112 O384 ( H2 O )116   | 0,10%  |
|              |       | PDF 52-1344    | Silicato de calcio y aluminio                   | Ca0.88 □0.12 Al1.77 Si2.23 O8  | 8,90%  |
|              |       | PDF 16-0344    | Silicato de potasio, magnesio, aluminio y flúor | K Mg3 ( Si3 Al ) O10 F2  | 4,31%  |
|              |       | PDF 89-6455    | Clinocloro lib-2 (Cr-bearing, deshidratado)     | Mg3 ( Mg2 Al ) ( ( Si3 Al ) O10 ) ( O H )2 O3                                      | 0,26%  |
|              |       | PDF 65-3928    | Covelina  | Cu S   | 6,42%  |
|              |       | PDF 52-0164    | Hidróxido magnésico sulfatado                   | Mg3 S2 O8 ( O H )2 / 2 Mg S O4 · Mg ( O H )2                                       | 4,89%  |
|              |       | COD 9002560    | Zircón  | O4 Si Zr   | 0,35%  |

### C5

| Grupo        | Color | Código muestra | Nombre       | Fórmula                          | Escala-Y | S-Q    |
|--------------|-------|----------------|--------------|----------------------------------|----------|--------|
| Plagioclasas |       | COD 9009663    | Albita       | Al1.02 CaO 0.2 Na 0.98 O8 Si2.98 | 76,99%   | 64,27% |
| Micas        |       | COD 9000468    | Biotita      | Al1.999 K0.5 Mg2.001 O12 Si3     | 38,05%   | 16,68% |
| SiO2         |       | COD 1011172    | Cuarzo bajo  | O2 Si                            | 99,47%   | 13,06% |
|              |       | COD 9008110    | Cristobalita | O2 Si                            | 53,96%   | 5,98%  |

## ANEXO II

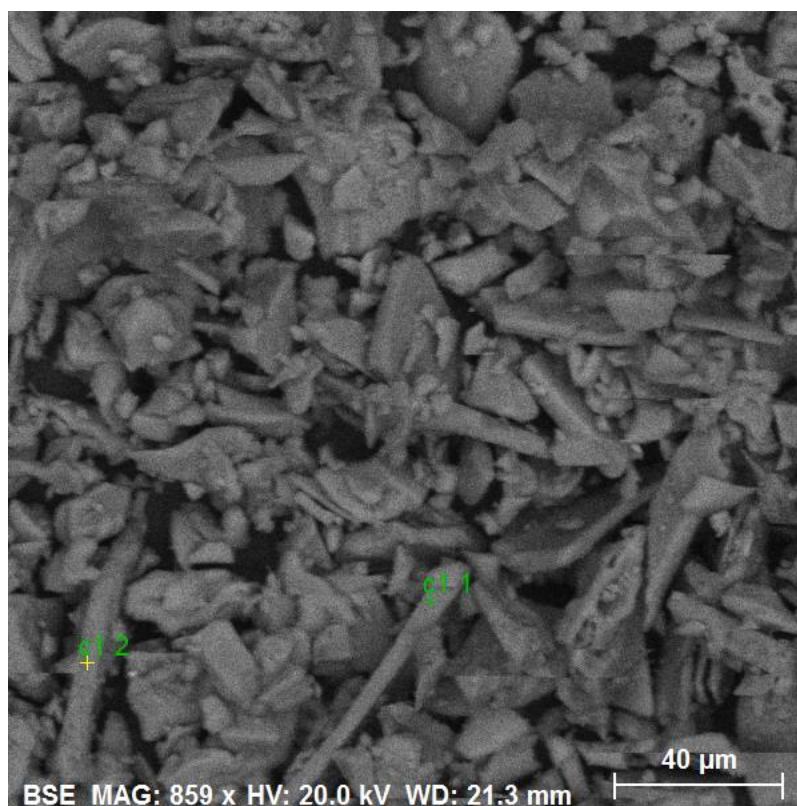
En este anexo se muestran las imágenes de Espectroscopía Dispersiva de Energía (EDE, EDS por sus siglas en inglés) obtenidas en el equipo MEB. Donde se exponen los puntos escogidos para obtener la química semicuantitativa de la muestra. Además, se establece la localidad cercana de cada muestra analizada.

### MUESTRA C1

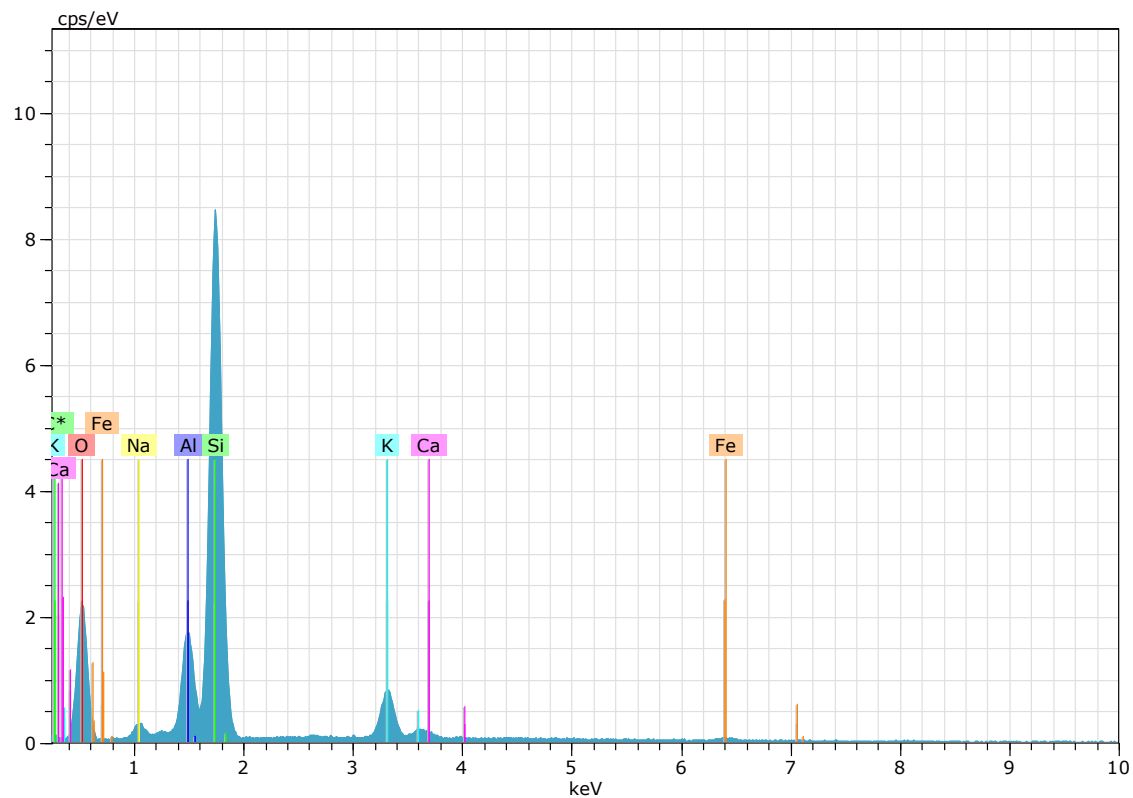
**Sector: Valle del río Claro**

**Localidad: Pisco Elqui**

**Vista General**



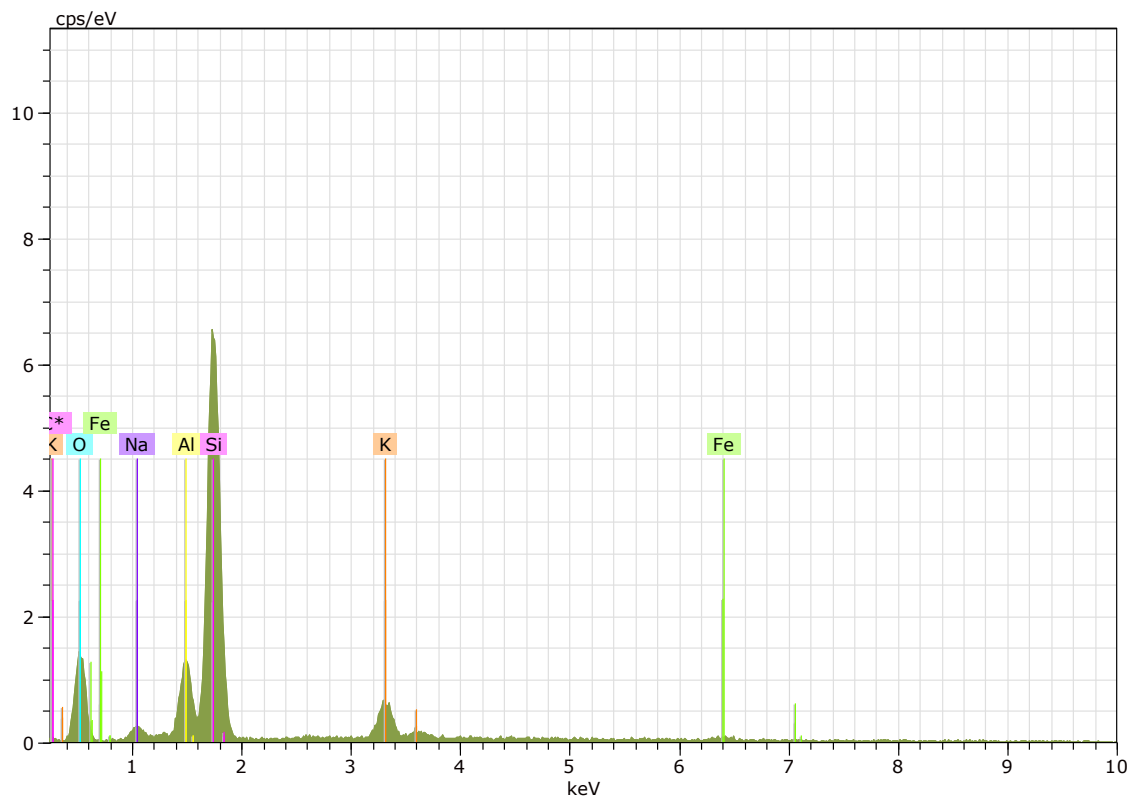
**Punto C1\_1**



Spectrum: c1\_1

| El     | AN | Series   | unn. C<br>[wt.%] | norm. C<br>[wt.%] | Atom. C<br>[at.%] | Error (1 Sigma)<br>[wt.%] |
|--------|----|----------|------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|
| O      | 8  | K-series | 39.14            | 45.54             | 59.90             | 4.95                      |
| Si     | 14 | K-series | 32.88            | 38.25             | 28.67             | 1.43                      |
| Al     | 13 | K-series | 7.47             | 8.69              | 6.78              | 0.39                      |
| K      | 19 | K-series | 3.98             | 4.63              | 2.49              | 0.15                      |
| Na     | 11 | K-series | 1.59             | 1.85              | 1.70              | 0.14                      |
| Fe     | 26 | K-series | 0.47             | 0.54              | 0.20              | 0.05                      |
| Ca     | 20 | K-series | 0.42             | 0.49              | 0.26              | 0.04                      |
| C      | 6  | K-series | 0.00             | 0.00              | 0.00              | 0.00                      |
| Total: |    |          | 85.95            | 100.00            | 100.00            |                           |

## Punto C1\_2



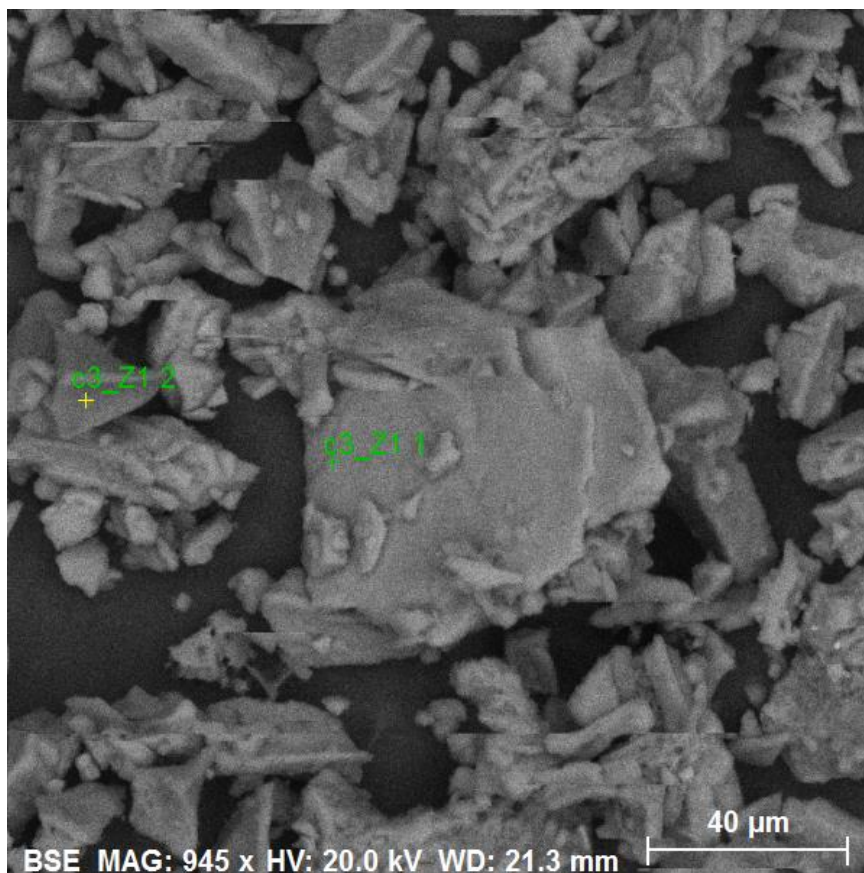
Spectrum: c1\_2

| El     | AN | Series   | unn. C<br>[wt.%] | norm. C<br>[wt.%] | Atom. C<br>[at.%] | Error (1 Sigma)<br>[wt.%] |
|--------|----|----------|------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|
| O      | 8  | K-series | 36.43            | 42.35             | 56.57             | 5.81                      |
| Si     | 14 | K-series | 35.97            | 41.82             | 31.82             | 1.59                      |
| Al     | 13 | K-series | 7.55             | 8.78              | 6.95              | 0.42                      |
| K      | 19 | K-series | 3.63             | 4.22              | 2.31              | 0.16                      |
| Na     | 11 | K-series | 1.99             | 2.31              | 2.15              | 0.20                      |
| Fe     | 26 | K-series | 0.45             | 0.53              | 0.20              | 0.06                      |
| C      | 6  | K-series | 0.00             | 0.00              | 0.00              | 0.00                      |
| Total: |    |          | 86.03            | 100.00            | 100.00            |                           |

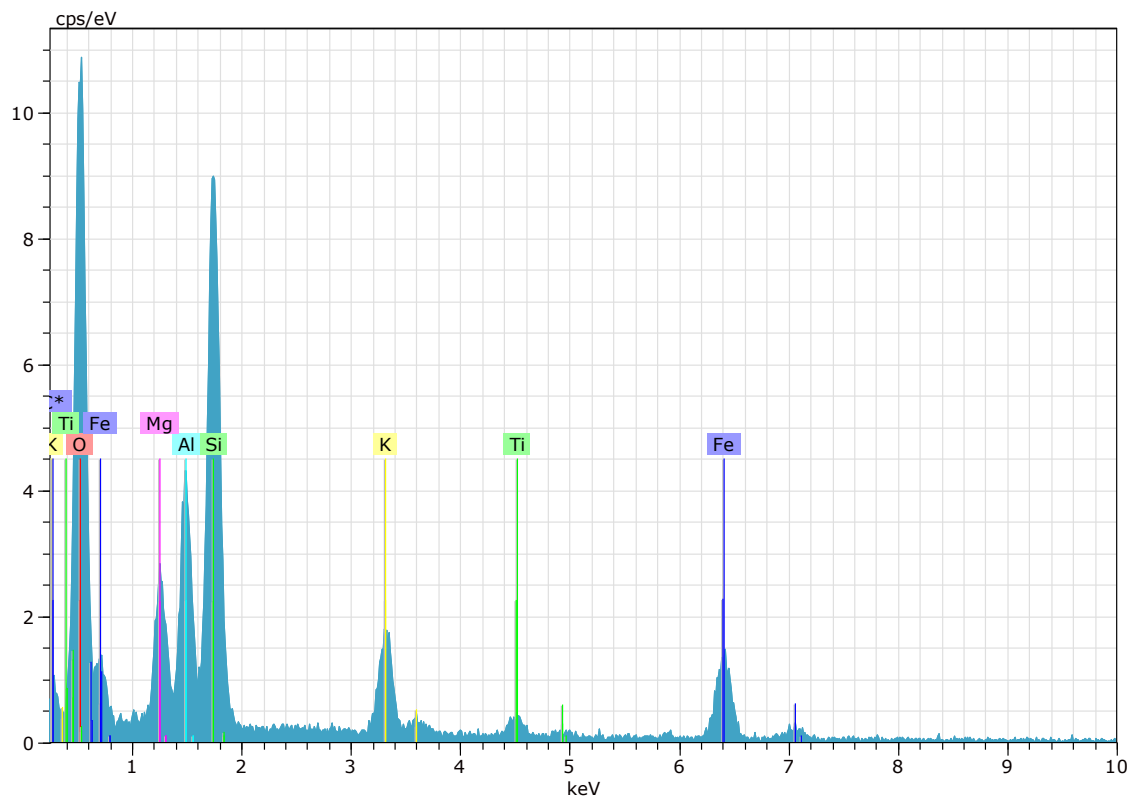
### MUESTRA C3

Sector: Valle del río Cochiguás

Vista General



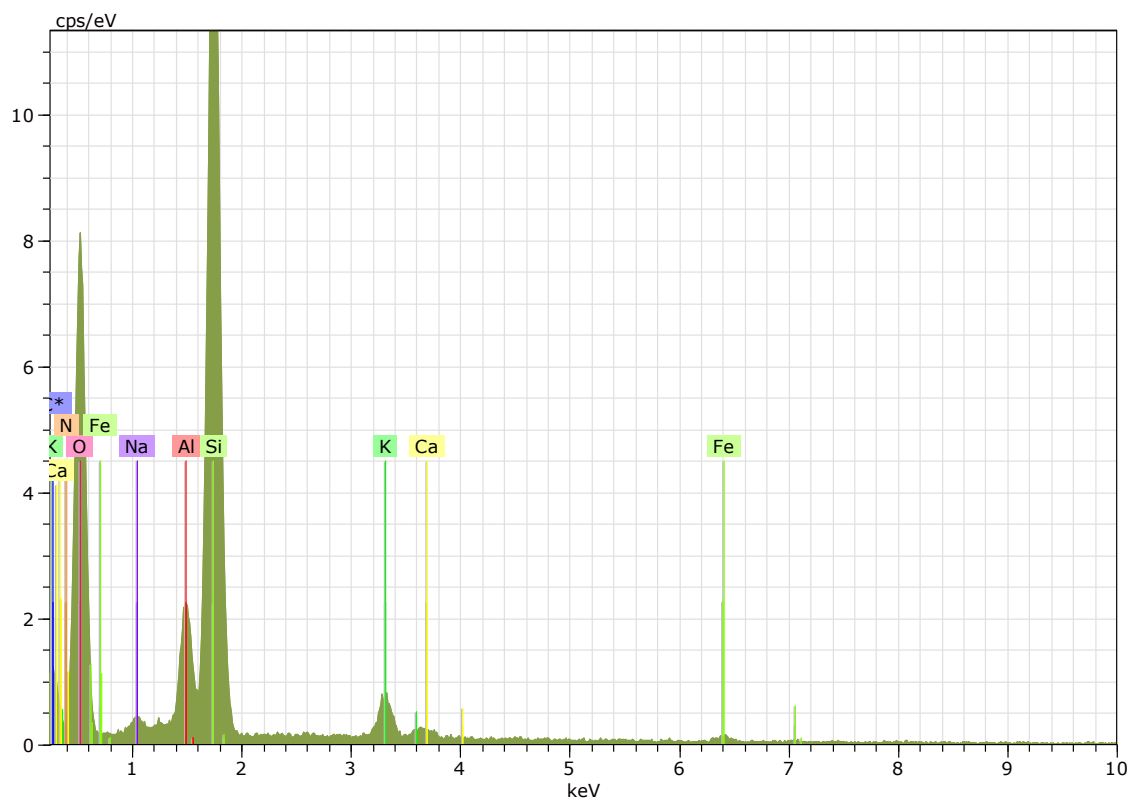
# Punto C3\_Z1\_1



Spectrum: c3\_z1\_1

| El     | AN | Series   | unn. C<br>[wt.%] | norm. C<br>[wt.%] | Atom. C<br>[at.%] | Error (1 Sigma)<br>[wt.%] |
|--------|----|----------|------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|
| O      | 8  | K-series | 51.58            | 58.38             | 74.61             | 7.10                      |
| Si     | 14 | K-series | 12.45            | 14.10             | 10.26             | 0.58                      |
| Fe     | 26 | K-series | 9.33             | 10.56             | 3.87              | 0.35                      |
| Al     | 13 | K-series | 5.35             | 6.05              | 4.59              | 0.31                      |
| K      | 19 | K-series | 4.63             | 5.25              | 2.74              | 0.20                      |
| Mg     | 12 | K-series | 3.24             | 3.67              | 3.09              | 0.23                      |
| Ti     | 22 | K-series | 1.76             | 1.99              | 0.85              | 0.12                      |
| C      | 6  | K-series | 0.00             | 0.00              | 0.00              | 0.00                      |
| Total: |    |          | 88.34            | 100.00            | 100.00            |                           |

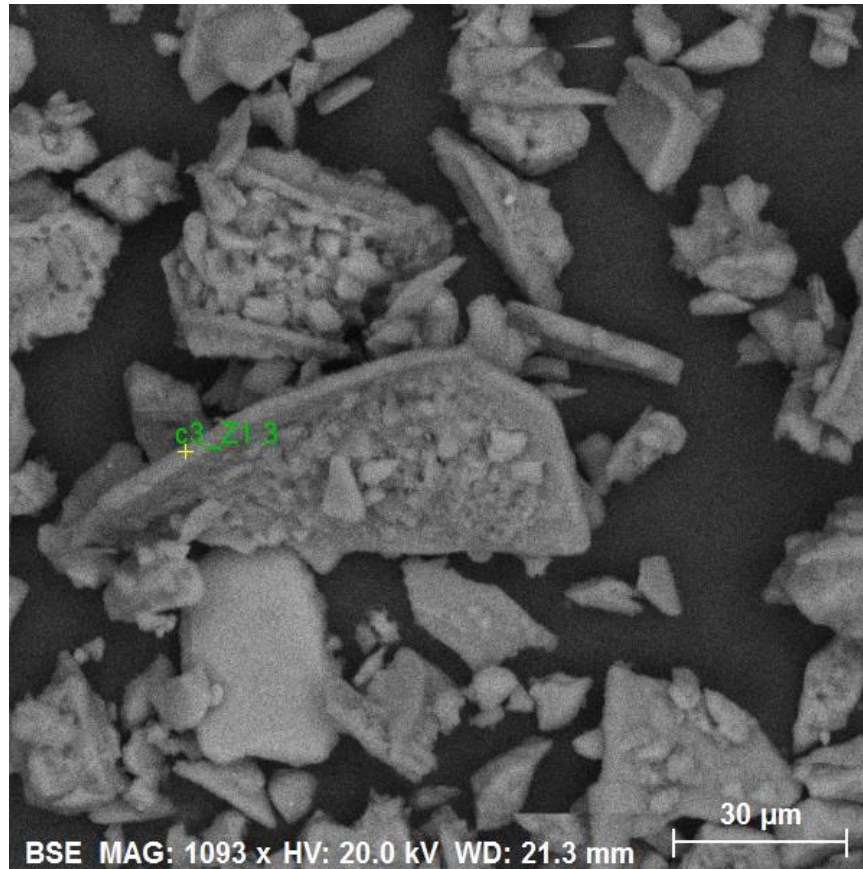
## Punto C3\_Z1\_2



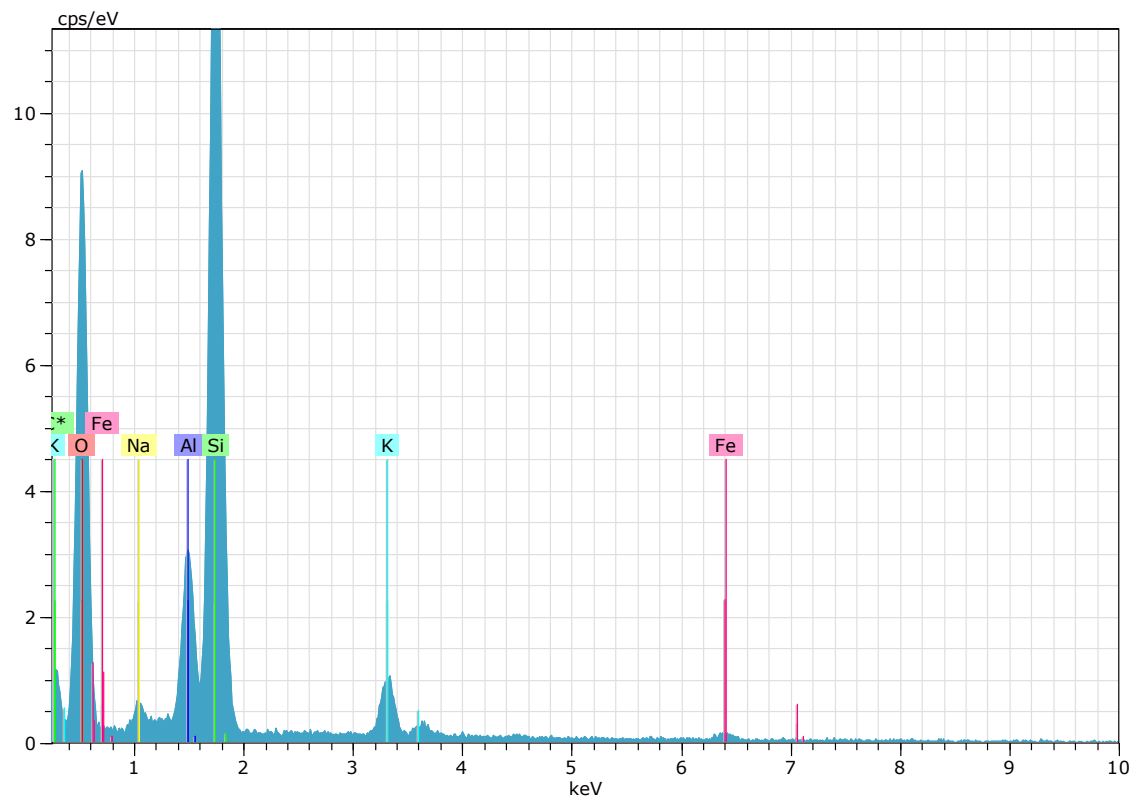
Spectrum: c3\_Z1\_2

| El     | AN | Series   | unn. C<br>[wt.%] | norm. C<br>[wt.%] | Atom. C<br>[at.%] | Error (1 Sigma)<br>[wt.%] |
|--------|----|----------|------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|
| O      | 8  | K-series | 84.22            | 58.55             | 66.24             | 10.28                     |
| Si     | 14 | K-series | 32.34            | 22.48             | 14.49             | 1.41                      |
| N      | 7  | K-series | 16.15            | 11.23             | 14.51             | 2.75                      |
| Al     | 13 | K-series | 5.79             | 4.03              | 2.70              | 0.32                      |
| K      | 19 | K-series | 2.46             | 1.71              | 0.79              | 0.11                      |
| Na     | 11 | K-series | 1.78             | 1.24              | 0.97              | 0.16                      |
| Fe     | 26 | K-series | 0.63             | 0.44              | 0.14              | 0.06                      |
| Ca     | 20 | K-series | 0.48             | 0.33              | 0.15              | 0.05                      |
| C      | 6  | K-series | 0.00             | 0.00              | 0.00              | 0.00                      |
| Total: |    |          | 143.85           | 100.00            | 100.00            |                           |

Punto C3\_Z1\_3





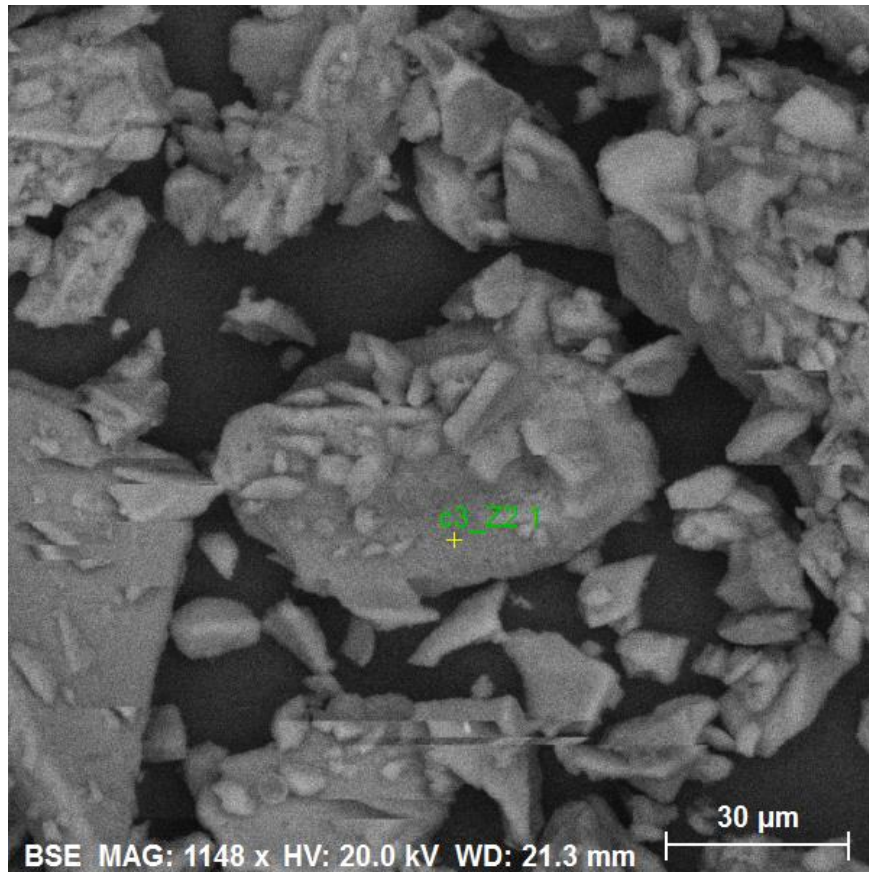


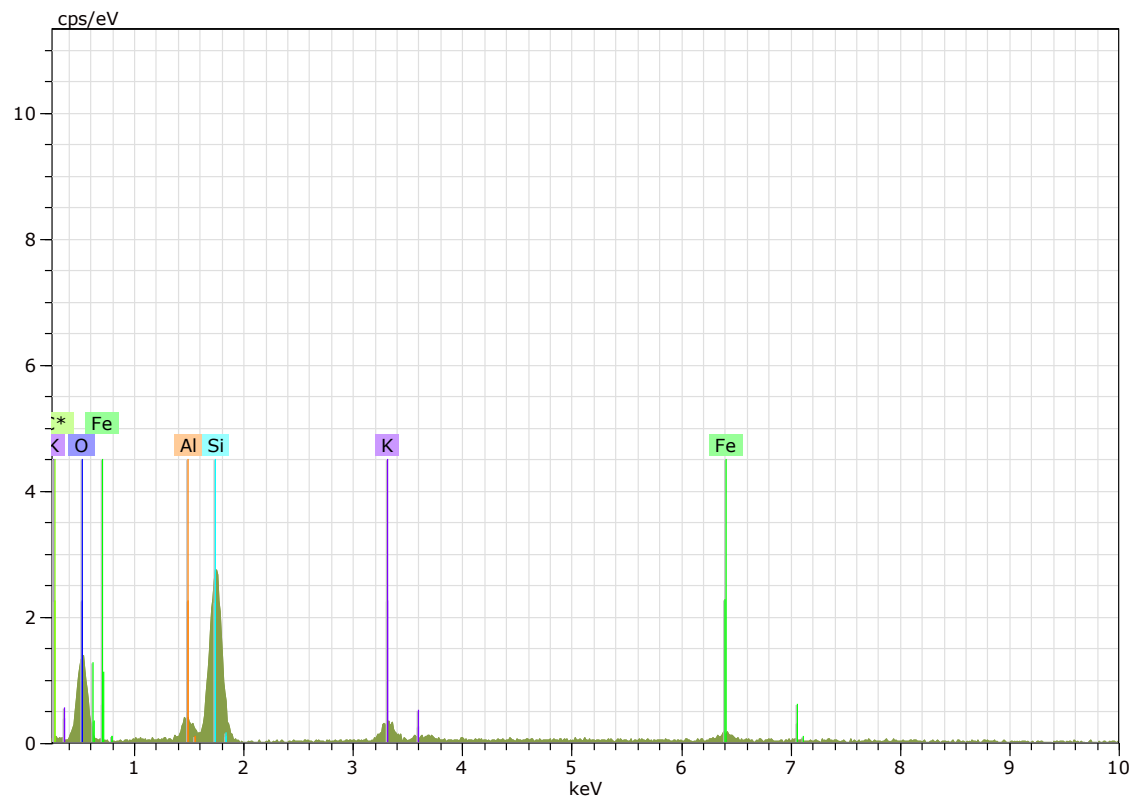
Spectrum: c3\_z1\_3

| El     | AN | Series   | unn. C<br>[wt.%] | norm. C<br>[wt.%] | Atom. C<br>[at.%] | Error (1 Sigma)<br>[wt.%] |
|--------|----|----------|------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|
| O      | 8  | K-series | 64.32            | 60.41             | 73.08             | 8.12                      |
| Si     | 14 | K-series | 29.09            | 27.33             | 18.83             | 1.28                      |
| Al     | 13 | K-series | 7.00             | 6.58              | 4.72              | 0.38                      |
| K      | 19 | K-series | 3.29             | 3.09              | 1.53              | 0.14                      |
| Na     | 11 | K-series | 2.02             | 1.90              | 1.60              | 0.18                      |
| Fe     | 26 | K-series | 0.75             | 0.71              | 0.24              | 0.07                      |
| C      | 6  | K-series | 0.00             | 0.00              | 0.00              | 0.00                      |
| Total: |    |          | 106.47           | 100.00            | 100.00            |                           |

## Punto C3\_Z2\_1

### Vista General





Spectrum: c3\_Z2\_1

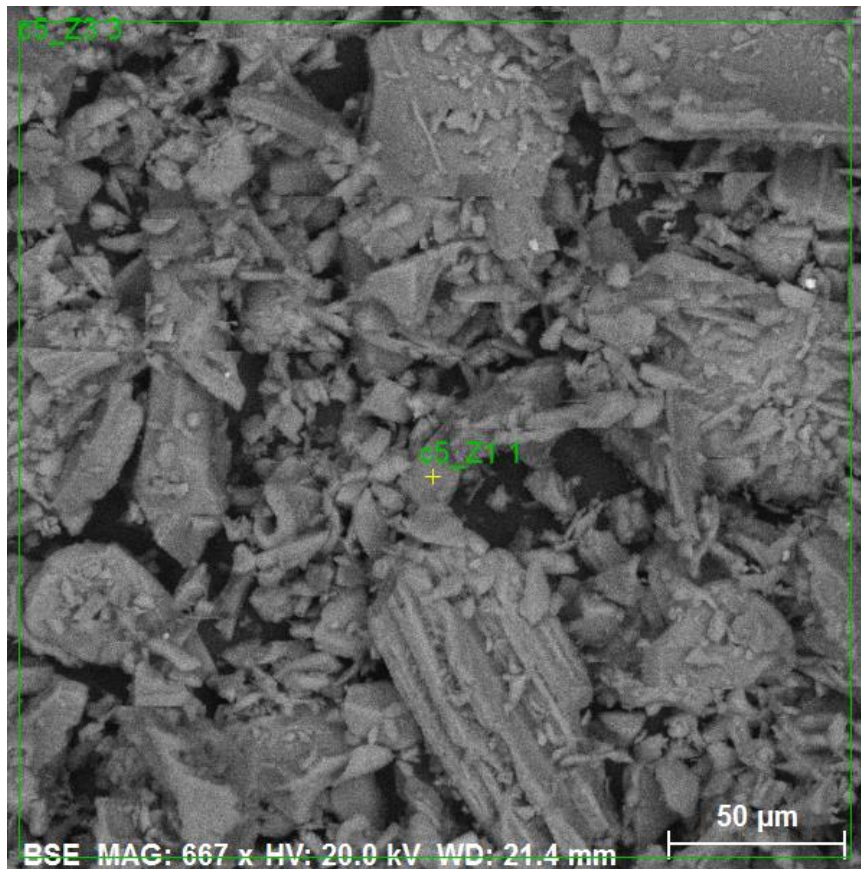
| El     | AN | Series   | unn. C<br>[wt.%] | norm. C<br>[wt.%] | Atom. C<br>[at.%] | Error (1 Sigma)<br>[wt.%] |
|--------|----|----------|------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|
| O      | 8  | K-series | 46.38            | 56.20             | 70.06             | 7.81                      |
| Si     | 14 | K-series | 28.43            | 34.45             | 24.47             | 1.32                      |
| Al     | 13 | K-series | 3.43             | 4.16              | 3.07              | 0.25                      |
| K      | 19 | K-series | 2.93             | 3.55              | 1.81              | 0.16                      |
| Fe     | 26 | K-series | 1.36             | 1.64              | 0.59              | 0.10                      |
| C      | 6  | K-series | 0.00             | 0.00              | 0.00              | 0.00                      |
| Total: |    |          | 82.53            | 100.00            | 100.00            |                           |

## MUESTRA C5

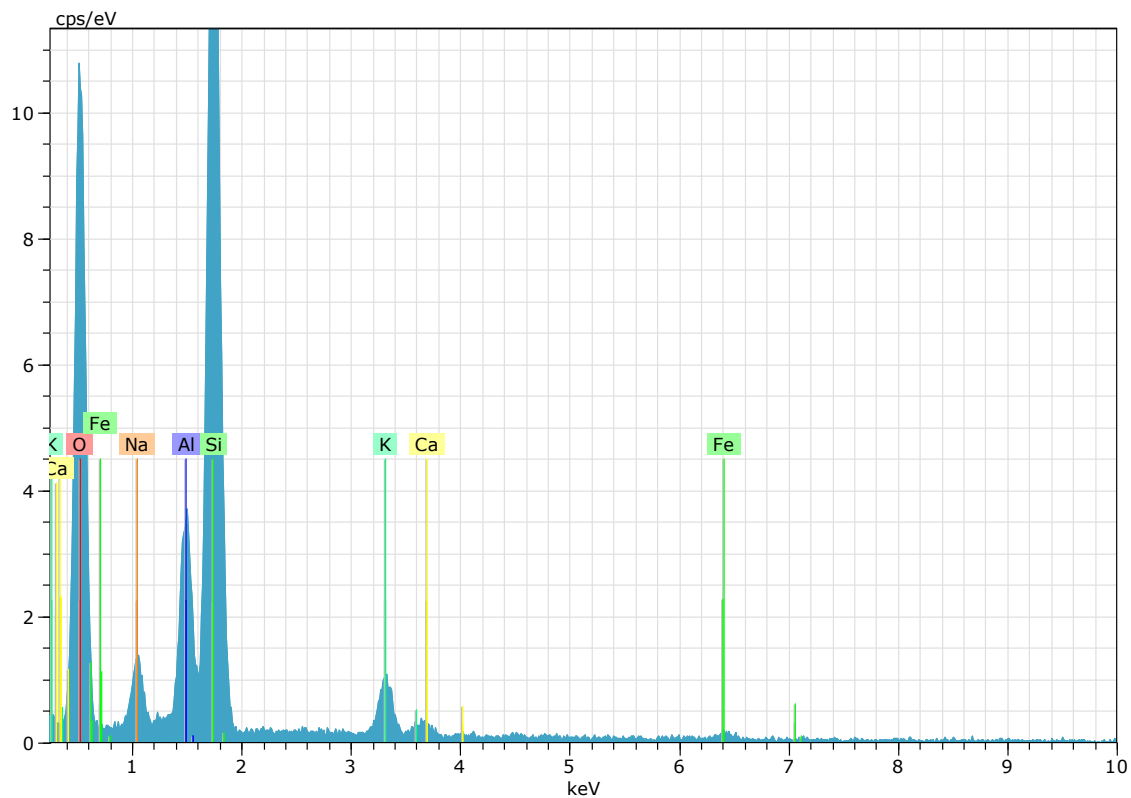
Sector: Quebrada Tres Cruces

Localidad: Paihuano

Vista General



# Punto C5\_Z1\_1

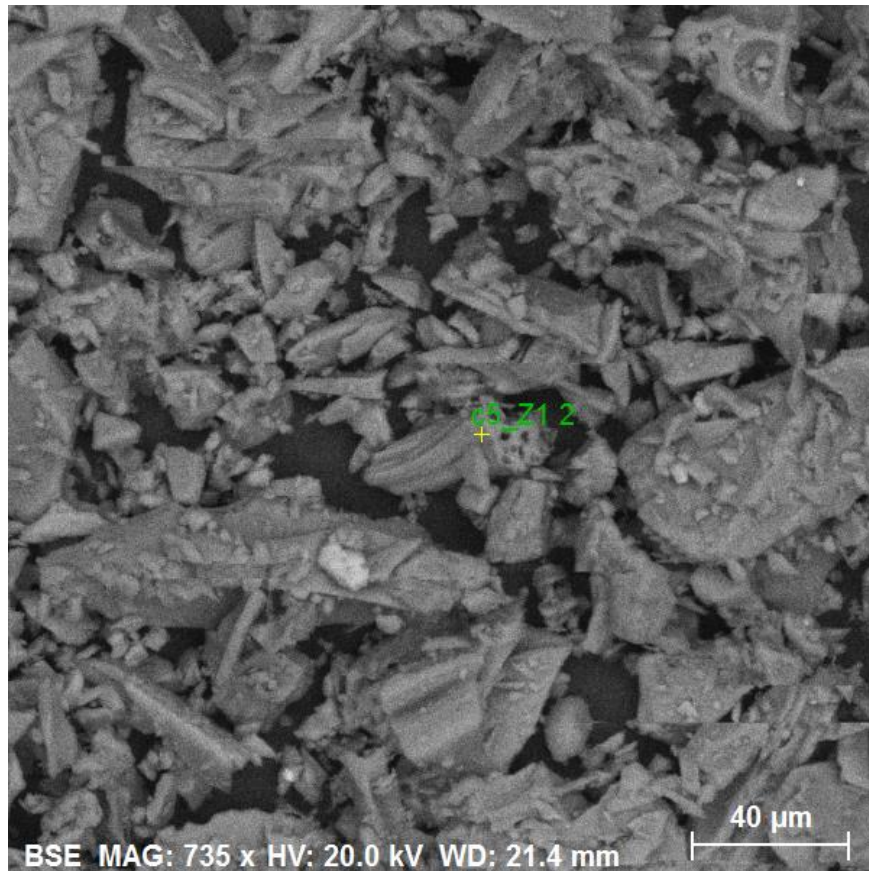


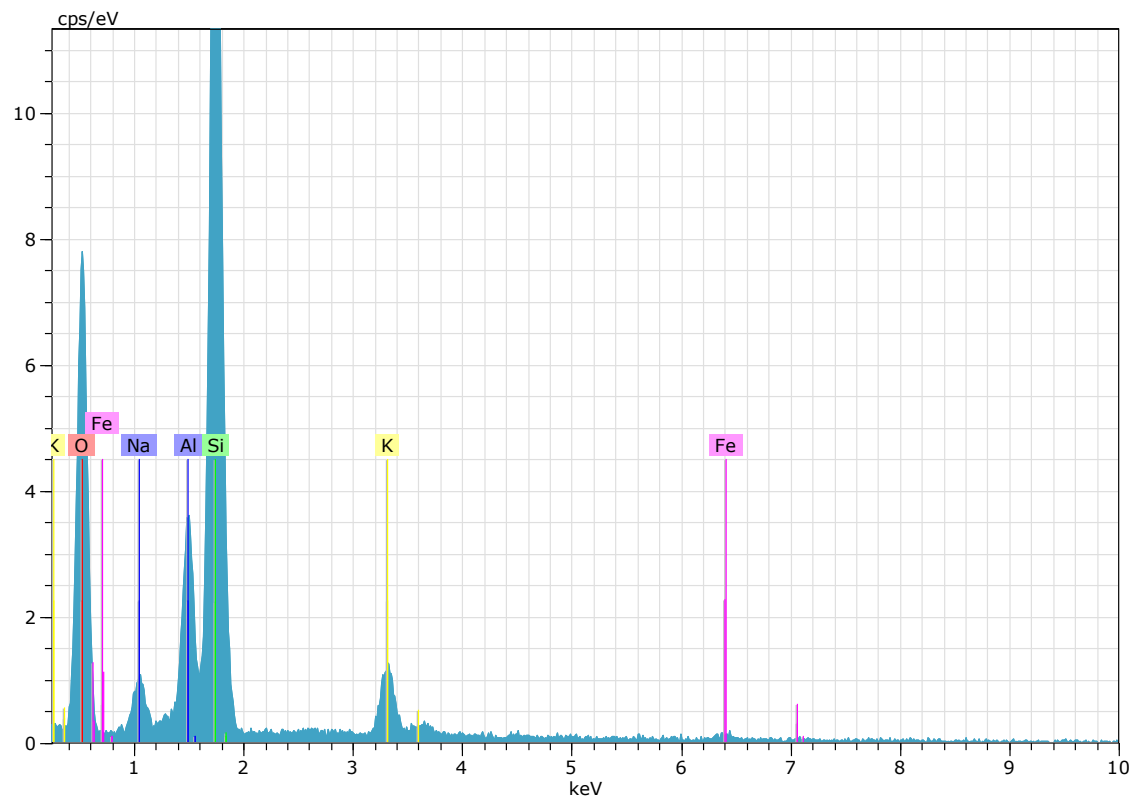
Spectrum: c5\_z1\_1

| El     | AN | Series   | unn. C<br>[wt.%] | norm. C<br>[wt.%] | Atom. C<br>[at.%] | Error (1 Sigma)<br>[wt.%] |
|--------|----|----------|------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|
| O      | 8  | K-series | 68.08            | 60.38             | 72.77             | 8.99                      |
| Si     | 14 | K-series | 28.11            | 24.93             | 17.12             | 1.25                      |
| Al     | 13 | K-series | 7.70             | 6.83              | 4.88              | 0.42                      |
| Na     | 11 | K-series | 4.70             | 4.17              | 3.49              | 0.38                      |
| K      | 19 | K-series | 3.03             | 2.68              | 1.32              | 0.15                      |
| Fe     | 26 | K-series | 0.61             | 0.54              | 0.19              | 0.07                      |
| Ca     | 20 | K-series | 0.52             | 0.46              | 0.22              | 0.06                      |
| Total: |    |          | 112.74           | 100.00            | 100.00            |                           |

## Punto C5\_Z1\_2

### Vista General





Spectrum: c5\_Z1\_2

| El     | AN | Series   | unn. C<br>[wt.%] | norm. C<br>[wt.%] | Atom. C<br>[at.%] | Error (1 Sigma)<br>[wt.%] |
|--------|----|----------|------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|
| O      | 8  | K-series | 49.94            | 55.35             | 68.67             | 6.79                      |
| Si     | 14 | K-series | 26.54            | 29.42             | 20.79             | 1.18                      |
| Al     | 13 | K-series | 6.63             | 7.34              | 5.40              | 0.37                      |
| K      | 19 | K-series | 3.36             | 3.73              | 1.89              | 0.15                      |
| Na     | 11 | K-series | 3.12             | 3.46              | 2.99              | 0.26                      |
| Fe     | 26 | K-series | 0.64             | 0.71              | 0.25              | 0.08                      |
| Total: |    |          | 90.23            | 100.00            | 100.00            |                           |

## ANEXO III

En este anexo se presenta la tabla resumen de los datos geoquímicos de elementos mayores obtenidos por Antinao *et al.*, 2015, mediante microsonda electrónica en esquirlas de vidrio.

| MUESTRA  | CU1556<br>on DM<br>>250 | CU1556<br>on DM<br>>250 | CU1556<br>on DM<br>>250 | CU1556<br>on DM<br>>250 | CU1556<br>on DM<br>>250 | CU1556<br>on DM<br>>250 | CU1556<br>on DM<br>>250 | CU1556<br>on DM<br>>250 | CU1556<br>on DM<br>>250 | CU1556<br>on DM<br>>250 | CU1556<br>on DM<br>>250 | CU1556<br>on DM<br>>250 | CU1556<br>on DM<br>>250 |
|----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| SECTOR   | Claro                   | Claro                   | Claro                   | Claro                   | Claro                   | Claro                   | Claro                   | Claro                   | Claro                   | Claro                   | Claro                   | Claro                   | Claro                   |
| SIO2 %   | 70.75                   | 71.70                   | 71.10                   | 71.78                   | 71.20                   | 71.27                   | 70.95                   | 71.64                   | 70.42                   | 71.18                   | 70.90                   | 71.56                   | 70.21                   |
| Al2O3 %  | 12.94                   | 13.20                   | 13.05                   | 13.09                   | 13.17                   | 13.18                   | 13.04                   | 13.06                   | 13.02                   | 13.19                   | 13.09                   | 13.12                   | 12.77                   |
| FeO%     | 1.12                    | 1.17                    | 1.17                    | 1.20                    | 1.18                    | 1.17                    | 1.19                    | 1.21                    | 1.21                    | 1.16                    | 1.19                    | 1.17                    | 1.20                    |
| MnO%     | 0.04                    | 0.03                    | 0.05                    | 0.05                    | 0.04                    | 0.03                    | 0.05                    | 0.01                    | 0.07                    | 0.05                    | 0.02                    | 0.06                    | 0.06                    |
| MgO%     | 0.14                    | 0.15                    | 0.12                    | 0.15                    | 0.14                    | 0.14                    | 0.16                    | 0.11                    | 0.15                    | 0.14                    | 0.17                    | 0.13                    | 0.18                    |
| CaO%     | 0.79                    | 0.74                    | 0.81                    | 0.78                    | 0.86                    | 0.90                    | 0.77                    | 0.77                    | 0.88                    | 0.90                    | 0.92                    | 0.78                    | 0.81                    |
| Na2O%    | 3.68                    | 4.14                    | 3.96                    | 3.62                    | 4.06                    | 4.32                    | 3.22                    | 3.54                    | 3.92                    | 3.55                    | 3.82                    | 3.74                    | 3.70                    |
| K2O%     | 5.00                    | 5.13                    | 4.99                    | 5.01                    | 5.20                    | 5.15                    | 5.11                    | 5.01                    | 5.00                    | 5.02                    | 5.04                    | 5.04                    | 5.00                    |
| TiO2%    | 0.22                    | 0.22                    | 0.21                    | 0.23                    | 0.20                    | 0.20                    | 0.21                    | 0.22                    | 0.19                    | 0.19                    | 0.18                    | 0.21                    | 0.21                    |
| P2O5%    | 0.02                    | 0.02                    | 0.04                    | 0.04                    | 0.03                    | 0.01                    | 0.01                    | 0.01                    | 0.03                    | 0.02                    | 0.02                    | 0.04                    | 0.04                    |
| H2O diff | 5.17                    | 3.33                    | 4.35                    | 3.89                    | 3.75                    | 3.47                    | 5.14                    | 4.27                    | 4.95                    | 4.47                    | 4.51                    | 4.00                    | 5.64                    |



| MUESTRA  | CU1556<br>on DM<br>>250 | CU1556<br>on DM<br>>250 | CU1556<br>on DM<br>>250 | CU1556<br>on DM<br>>250 | CU1556<br>on DM<br>>250 | CU1556<br>on DM<br>>250 | CU1556<br>on DM<br>>250 | CU1556<br>on DM<br>>250 | CU1556<br>on DM<br>>250 | CU1556<br>on DM<br>>250 | CU1556<br>on DM<br>>250 | CU1557<br>on DM<br>>250 | CU1557<br>on DM<br>>250 |
|----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| SECTOR   | Claro                   | Claro                   | Claro                   | Claro                   | Claro                   | Claro                   | Claro                   | Claro                   | Claro                   | Claro                   | Claro                   | Claro                   | Claro                   |
| SIO2 %   | 71.07                   | 71.41                   | 71.75                   | 71.62                   | 70.77                   | 71.08                   | 70.51                   | 70.93                   | 71.62                   | 70.77                   | 71.09                   | 71.10                   | 71.38                   |
| Al2O3 %  | 13.11                   | 12.95                   | 13.07                   | 13.09                   | 12.83                   | 13.09                   | 12.77                   | 12.84                   | 13.15                   | 13.03                   | 13.03                   | 12.94                   | 13.25                   |
| FeO%     | 1.13                    | 1.14                    | 1.15                    | 1.12                    | 1.10                    | 1.11                    | 1.15                    | 1.23                    | 1.21                    | 1.18                    | 1.13                    | 1.13                    | 1.12                    |
| MnO%     | 0.05                    | 0.02                    | 0.09                    | 0.04                    | 0.04                    | 0.06                    | 0.08                    | 0.07                    | 0.06                    | 0.10                    | 0.06                    | 0.02                    | 0.05                    |
| MgO%     | 0.15                    | 0.15                    | 0.16                    | 0.15                    | 0.16                    | 0.18                    | 0.16                    | 0.16                    | 0.15                    | 0.16                    | 0.14                    | 0.15                    | 0.13                    |
| CaO%     | 0.85                    | 0.91                    | 0.87                    | 0.78                    | 0.80                    | 0.74                    | 0.89                    | 0.88                    | 0.80                    | 0.79                    | 0.88                    | 0.68                    | 0.76                    |
| Na2O%    | 4.07                    | 3.71                    | 3.79                    | 3.88                    | 3.46                    | 3.98                    | 3.96                    | 3.39                    | 3.74                    | 4.32                    | 3.94                    | 3.21                    | 3.65                    |
| K2O%     | 4.97                    | 5.10                    | 5.09                    | 5.14                    | 5.18                    | 4.89                    | 4.95                    | 5.15                    | 4.97                    | 5.04                    | 4.96                    | 5.11                    | 5.13                    |
| TiO2%    | 0.19                    | 0.19                    | 0.21                    | 0.18                    | 0.20                    | 0.21                    | 0.19                    | 0.20                    | 0.21                    | 0.21                    | 0.23                    | 0.19                    | 0.19                    |
| P2O5%    | 0.05                    | 0.03                    | 0.03                    | 0.05                    | 0.01                    | 0.04                    | 0.07                    | 0.15                    | 0.10                    | 0.05                    | 0.06                    | 0.05                    | 0.02                    |
| H2O diff | 4.20                    | 4.23                    | 3.64                    | 3.80                    | 5.30                    | 4.42                    | 5.10                    | 4.82                    | 3.81                    | 4.19                    | 4.30                    | 5.25                    | 4.15                    |

| MUESTRA  | CU1557<br>on DM<br>>250 | CU1557<br>on DM<br>>250 | CU1557<br>on DM<br>>250 | CU1557<br>on DM<br>>250 | CU1557<br>on DM<br>>250 | CU1557<br>on DM<br>>250 | CU1557<br>on DM<br>>250 | CU1557<br>on DM<br>>250 | CU1557<br>on DM<br>>250 | CU1557<br>on DM<br>>250 | CU1557<br>on DM<br>>250 | CU1557<br>on DM<br>>250 | CU1557<br>on DM<br>>250 |
|----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| SECTOR   | Claro                   | Claro                   | Claro                   | Claro                   | Claro                   | Claro                   | Claro                   | Claro                   | Claro                   | Claro                   | Claro                   | Claro                   | Claro                   |
| SIO2 %   | 71.24                   | 71.16                   | 71.02                   | 70.42                   | 70.02                   | 69.84                   | 71.01                   | 70.57                   | 70.51                   | 70.76                   | 70.19                   | 70.87                   | 71.47                   |
| Al2O3 %  | 13.18                   | 13.14                   | 13.08                   | 12.95                   | 12.65                   | 12.91                   | 13.15                   | 12.92                   | 13.13                   | 13.05                   | 13.05                   | 13.23                   | 13.33                   |
| FeO%     | 1.11                    | 1.10                    | 1.10                    | 1.16                    | 1.13                    | 1.17                    | 1.15                    | 1.10                    | 1.10                    | 1.16                    | 1.16                    | 1.07                    | 1.10                    |
| MnO%     | 0.04                    | 0.01                    | 0.02                    | 0.03                    | 0.05                    | 0.07                    | 0.05                    | 0.02                    | 0.07                    | 0.03                    | 0.04                    | 0.07                    | 0.07                    |
| MgO%     | 0.14                    | 0.15                    | 0.17                    | 0.16                    | 0.14                    | 0.14                    | 0.14                    | 0.14                    | 0.16                    | 0.14                    | 0.14                    | 0.14                    | 0.15                    |
| CaO%     | 0.83                    | 0.84                    | 0.86                    | 0.92                    | 0.93                    | 0.92                    | 0.89                    | 0.79                    | 0.68                    | 0.71                    | 0.72                    | 0.74                    | 0.74                    |
| Na2O%    | 3.45                    | 3.57                    | 3.53                    | 4.10                    | 4.17                    | 3.89                    | 3.43                    | 3.89                    | 3.61                    | 3.42                    | 4.16                    | 4.27                    | 3.98                    |
| K2O%     | 5.08                    | 5.16                    | 5.03                    | 4.86                    | 4.76                    | 4.99                    | 4.97                    | 5.18                    | 5.16                    | 5.07                    | 4.96                    | 4.93                    | 4.95                    |
| TiO2%    | 0.19                    | 0.20                    | 0.24                    | 0.21                    | 0.19                    | 0.25                    | 0.21                    | 0.19                    | 0.22                    | 0.18                    | 0.20                    | 0.18                    | 0.21                    |
| P2O5%    | 0.01                    | 0.05                    | 0.02                    | 0.04                    | 0.01                    | 0.03                    | 0.03                    | 0.00                    | 0.03                    | 0.01                    | 0.02                    | 0.04                    | 0.05                    |
| H2O diff | 4.57                    | 4.48                    | 4.78                    | 4.98                    | 5.79                    | 5.63                    | 4.82                    | 5.07                    | 5.18                    | 5.30                    | 5.20                    | 4.28                    | 3.79                    |

| MUESTRA  | CU1557<br>on DM<br>>250 | CU1557<br>on DM<br>>250 | CU1557<br>on DM<br>>250 | CU1557<br>on DM<br>>250 | CU1557<br>on DM<br>>250 | CU1557<br>on DM<br>>250 | CU1557<br>on DM<br>>250 | CU1557<br>on DM<br>>250 | CU1557<br>on DM<br>>250 | CU1558<br>>250 | CU1558<br>>250 | CU1558<br>>250 | CU1558<br>>250 | CU1558<br>>250 |
|----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| SECTOR   | Claro                   | Claro                   | Claro                   | Claro                   | Claro                   | Claro                   | Claro                   | Claro                   | Claro                   | Claro          | Claro          | Claro          | Claro          | Claro          |
| SIO2 %   | 71.70                   | 70.39                   | 70.93                   | 70.78                   | 71.88                   | 70.84                   | 71.26                   | 71.36                   | 71.27                   | 72.38          | 71.30          | 71.09          | 71.19          | 71.19          |
| Al2O3 %  | 13.33                   | 13.09                   | 13.18                   | 12.90                   | 13.32                   | 13.00                   | 12.90                   | 13.12                   | 13.04                   | 13.23          | 12.76          | 12.81          | 12.94          | 12.94          |
| FeO%     | 1.08                    | 1.15                    | 1.16                    | 1.13                    | 1.14                    | 1.09                    | 1.20                    | 1.15                    | 1.12                    | 1.13           | 1.11           | 1.16           | 1.12           | 1.12           |
| MnO%     | 0.03                    | 0.05                    | 0.03                    | 0.04                    | 0.06                    | 0.04                    | 0.07                    | 0.07                    | 0.04                    | 0.05           | 0.03           | 0.07           | 0.04           | 0.04           |
| MgO%     | 0.13                    | 0.15                    | 0.18                    | 0.13                    | 0.12                    | 0.14                    | 0.16                    | 0.16                    | 0.12                    | 0.15           | 0.15           | 0.15           | 0.13           | 0.13           |
| CaO%     | 0.71                    | 0.74                    | 0.73                    | 0.75                    | 0.73                    | 0.80                    | 0.74                    | 0.72                    | 0.76                    | 0.70           | 0.77           | 0.75           | 0.75           | 0.75           |
| Na2O%    | 3.68                    | 4.07                    | 3.92                    | 3.96                    | 3.98                    | 3.97                    | 3.83                    | 4.54                    | 3.46                    | 3.89           | 4.00           | 3.79           | 3.74           | 3.74           |
| K2O%     | 4.97                    | 5.05                    | 5.16                    | 5.21                    | 5.17                    | 5.09                    | 5.05                    | 4.81                    | 5.02                    | 4.95           | 4.94           | 4.95           | 4.89           | 4.89           |
| TiO2%    | 0.19                    | 0.21                    | 0.22                    | 0.20                    | 0.20                    | 0.20                    | 0.20                    | 0.21                    | 0.20                    | 0.22           | 0.22           | 0.19           | 0.20           | 0.20           |
| P2O5%    | 0.03                    | 0.02                    | 0.01                    | 0.03                    | 0.01                    | 0.02                    | 0.05                    | 0.02                    | 0.04                    | 0.02           | 0.05           | 0.00           | 0.02           | 0.02           |
| H2O diff | 3.99                    | 4.91                    | 4.30                    | 4.72                    | 3.22                    | 4.64                    | 4.38                    | 3.64                    | 4.77                    | 3.14           | 4.51           | 4.88           | 4.83           | 4.83           |

| MUESTRA  | CU1558<br>>250 | CU1558<br>>250 | CU1558<br>>250 | CU1558<br>>250 | CU1558<br>>250 | CU1558<br>>250 | CU1558<br>>250 | CU1558<br>>250 | CU1558<br>>250 | CU1558<br>>250 | CU1558<br>>250 | CU1559<br>>250 | CU1559<br>>250 | CU1559<br>>250 |
|----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| SECTOR   | Claro          | Claro          | Claro          | Claro          | Claro          | Claro          | Claro          | Claro          | Claro          | Claro          | Claro          | Claro          | Claro          | Claro          |
| SIO2 %   | 70.21          | 70.47          | 70.96          | 70.75          | 71.33          | 70.75          | 70.93          | 70.41          | 71.28          | 70.81          | 70.53          | 71.42          | 70.97          | 70.97          |
| Al2O3 %  | 12.72          | 12.60          | 12.83          | 12.96          | 13.08          | 12.80          | 12.81          | 12.87          | 13.07          | 12.81          | 12.76          | 13.02          | 12.95          | 12.95          |
| FeO%     | 1.14           | 1.11           | 1.12           | 1.15           | 1.16           | 1.11           | 1.13           | 1.14           | 1.17           | 1.06           | 1.14           | 1.09           | 1.10           | 1.10           |
| MnO%     | 0.06           | 0.06           | 0.04           | 0.06           | 0.04           | 0.05           | 0.02           | 0.04           | 0.04           | 0.08           | 0.02           | 0.05           | 0.05           | 0.05           |
| MgO%     | 0.15           | 0.15           | 0.16           | 0.17           | 0.13           | 0.14           | 0.12           | 0.14           | 0.15           | 0.16           | 0.13           | 0.14           | 0.14           | 0.14           |
| CaO%     | 0.73           | 0.72           | 0.73           | 0.72           | 0.71           | 0.71           | 0.76           | 0.74           | 0.76           | 0.74           | 0.82           | 0.77           | 0.79           | 0.79           |
| Na2O%    | 3.71           | 4.14           | 3.88           | 4.03           | 3.75           | 3.23           | 3.85           | 3.52           | 3.95           | 3.41           | 3.41           | 3.74           | 3.30           | 3.30           |
| K2O%     | 4.91           | 4.85           | 4.95           | 5.00           | 4.94           | 5.01           | 5.05           | 5.02           | 4.99           | 4.99           | 5.11           | 5.07           | 4.98           | 4.98           |
| TiO2%    | 0.18           | 0.20           | 0.23           | 0.23           | 0.21           | 0.21           | 0.19           | 0.20           | 0.18           | 0.22           | 0.19           | 0.21           | 0.20           | 0.20           |
| P2O5%    | 0.02           | 0.03           | 0.04           | 0.02           | 0.03           | 0.02           | 0.01           | 0.03           | 0.01           | 0.02           | 0.02           | 0.05           | 0.03           | 0.03           |
| H2O diff | 6.00           | 5.53           | 4.92           | 4.72           | 4.44           | 5.81           | 4.95           | 5.72           | 4.24           | 5.55           | 5.71           | 4.28           | 5.32           | 5.32           |

| MUESTRA  | CU1559<br>>250 | CU1559<br>>250 | CU1559<br>>250 | CU1559<br>>250 | CU1559<br>>250 | CU1559<br>>250 | CU1559<br>>250 | CU1559<br>>250 | CU1559<br>>250 | CU1559<br>>250 | CU1559<br>>250 | CU1559<br>>250 | CU1560<br>>250 |
|----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| SECTOR   | Claro          | Claro          | Claro          | Claro          | Claro          | Claro          | Claro          | Claro          | Claro          | Claro          | Claro          | Claro          | Claro          |
| SIO2 %   | 70.61          | 70.97          | 71.10          | 70.46          | 70.47          | 71.45          | 71.43          | 71.22          | 71.31          | 71.04          | 71.40          | 71.40          | 70.92          |
| Al2O3 %  | 12.70          | 12.94          | 12.81          | 12.86          | 12.77          | 12.92          | 13.25          | 13.06          | 13.05          | 12.98          | 12.97          | 13.18          | 12.68          |
| FeO%     | 1.13           | 1.17           | 1.14           | 1.25           | 1.17           | 1.23           | 1.14           | 1.08           | 1.12           | 1.14           | 1.12           | 1.29           | 1.14           |
| MnO%     | 0.06           | 0.05           | 0.04           | 0.04           | 0.06           | 0.02           | 0.05           | 0.04           | 0.05           | 0.03           | 0.05           | 0.05           | 0.06           |
| MgO%     | 0.16           | 0.15           | 0.16           | 0.13           | 0.13           | 0.16           | 0.13           | 0.15           | 0.14           | 0.14           | 0.14           | 0.16           | 0.14           |
| CaO%     | 0.82           | 0.76           | 0.83           | 0.80           | 0.73           | 0.73           | 0.72           | 0.79           | 0.80           | 0.81           | 0.82           | 0.75           | 0.76           |
| Na2O%    | 3.79           | 4.00           | 3.99           | 3.86           | 3.80           | 3.77           | 4.01           | 4.28           | 3.53           | 3.54           | 3.87           | 3.49           | 4.19           |
| K2O%     | 5.04           | 5.04           | 5.04           | 4.90           | 4.77           | 5.05           | 5.10           | 5.07           | 5.05           | 5.10           | 4.86           | 5.14           | 5.00           |
| TiO2%    | 0.21           | 0.19           | 0.19           | 0.22           | 0.21           | 0.20           | 0.21           | 0.19           | 0.22           | 0.21           | 0.18           | 0.19           | 0.20           |
| P2O5%    | 0.02           | 0.02           | 0.02           | 0.01           | 0.03           | 0.04           | 0.04           | 0.02           | 0.02           | 0.02           | 0.03           | 0.01           | 0.03           |
| H2O diff | 5.31           | 4.52           | 4.52           | 5.31           | 5.73           | 4.29           | 3.76           | 3.92           | 4.54           | 4.82           | 4.39           | 4.18           | 4.72           |

| MUESTRA  | CU1560<br>>250 | CU1560<br>>250 | CU1560<br>>250 | CU1560<br>>250 | CU1560<br>>250 | CU1560<br>>250 | CU1560<br>>250 | CU1560<br>>250 | CU1560<br>>250 | CU1561<br>>250 | CU1561<br>>250 | CU1561<br>>250 | CU1561<br>>250 |
|----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| SECTOR   | Claro          | Claro          | Claro          | Claro          | Claro          | Claro          | Claro          | Claro          | Claro          | Cochiguás      | Cochiguás      | Cochiguás      | Cochiguás      |
| SIO2 %   | 71.57          | 71.01          | 71.23          | 71.02          | 71.38          | 71.19          | 71.36          | 71.60          | 70.77          | 72.90          | 72.85          | 72.98          | 71.05          |
| Al2O3 %  | 12.98          | 12.72          | 12.97          | 13.01          | 12.83          | 12.87          | 13.33          | 13.23          | 12.74          | 12.73          | 12.49          | 12.78          | 12.45          |
| FeO%     | 1.09           | 1.18           | 1.11           | 1.05           | 1.17           | 1.11           | 1.12           | 1.11           | 1.15           | 0.59           | 0.56           | 0.58           | 0.58           |
| MnO%     | 0.03           | 0.05           | 0.06           | 0.03           | 0.04           | 0.04           | 0.04           | 0.02           | 0.04           | 0.06           | 0.10           | 0.09           | 0.05           |
| MgO%     | 0.14           | 0.15           | 0.15           | 0.13           | 0.15           | 0.13           | 0.13           | 0.13           | 0.12           | 0.11           | 0.09           | 0.10           | 0.10           |
| CaO%     | 0.74           | 0.69           | 0.81           | 0.75           | 0.67           | 0.77           | 0.80           | 0.76           | 0.72           | 0.50           | 0.48           | 0.50           | 0.54           |
| Na2O%    | 4.31           | 3.67           | 3.99           | 4.01           | 3.38           | 4.57           | 3.90           | 3.98           | 3.73           | 4.48           | 3.78           | 4.21           | 4.11           |
| K2O%     | 5.09           | 5.13           | 5.10           | 5.10           | 5.43           | 4.97           | 4.95           | 5.14           | 5.14           | 4.21           | 4.03           | 4.07           | 3.61           |
| TiO2%    | 0.21           | 0.20           | 0.22           | 0.19           | 0.21           | 0.19           | 0.19           | 0.23           | 0.21           | 0.11           | 0.12           | 0.09           | 0.09           |
| P2O5%    | 0.04           | 0.03           | 0.02           | 0.01           | 0.02           | 0.01           | 0.01           | 0.03           | 0.01           | 0.05           | 0.02           | 0.03           | 0.05           |
| H2O diff | 3.66           | 5.02           | 4.18           | 4.51           | 4.58           | 4.00           | 4.00           | 3.60           | 5.21           | 4.16           | 5.38           | 4.47           | 7.29           |

| MUESTRA  | CU1561<br>>250 | CU1561<br>>250 | CU1561<br>>250 | CU1561<br>>250 | CU1561<br>>250 | CU1561<br>>250 | CU1561<br>>250 | CU1561<br>>250 | CU1561<br>>250 | CU1561<br>>250 | CU1561<br>>250 | CU1561<br>>250 | CU1561<br>>250 |
|----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| SECTOR   | Cochiguás      | Cochiguás      | Cochiguás      | Cochiguás      | Cochiguás      | Cochiguás      | Cochiguás      | Cochiguás      | Cochiguás      | Cochiguás      | Cochiguás      | Cochiguás      | Cochiguás      |
| SIO2 %   | 71.25          | 70.88          | 72.06          | 71.79          | 72.23          | 73.29          | 72.63          | 72.31          | 73.25          | 73.42          | 72.89          | 72.11          | 73.10          |
| Al2O3 %  | 12.58          | 12.13          | 12.40          | 12.49          | 12.27          | 12.58          | 12.60          | 12.42          | 12.38          | 12.71          | 12.78          | 12.48          | 12.71          |
| FeO%     | 0.64           | 0.57           | 0.55           | 0.54           | 0.56           | 0.58           | 0.58           | 0.57           | 0.59           | 0.57           | 0.55           | 0.56           | 0.63           |
| MnO%     | 0.13           | 0.08           | 0.10           | 0.09           | 0.10           | 0.08           | 0.03           | 0.05           | 0.07           | 0.07           | 0.05           | 0.07           | 0.07           |
| MgO%     | 0.09           | 0.09           | 0.10           | 0.08           | 0.08           | 0.10           | 0.11           | 0.09           | 0.10           | 0.09           | 0.09           | 0.10           | 0.09           |
| CaO%     | 0.50           | 0.52           | 0.50           | 0.45           | 0.46           | 0.47           | 0.48           | 0.45           | 0.48           | 0.52           | 0.47           | 0.44           | 0.42           |
| Na2O%    | 4.18           | 4.17           | 4.45           | 4.21           | 4.56           | 4.19           | 3.92           | 4.21           | 4.13           | 4.18           | 4.29           | 4.55           | 4.58           |
| K2O%     | 3.68           | 3.71           | 3.92           | 3.92           | 3.91           | 3.95           | 3.91           | 3.92           | 3.89           | 4.06           | 3.76           | 3.66           | 3.78           |
| TiO2%    | 0.08           | 0.07           | 0.11           | 0.09           | 0.12           | 0.09           | 0.10           | 0.11           | 0.10           | 0.09           | 0.09           | 0.08           | 0.09           |
| P2O5%    | 0.03           | 0.03           | 0.05           | 0.02           | 0.02           | 0.01           | 0.04           | 0.05           | 0.04           | 0.03           | 0.04           | 0.01           | 0.02           |
| H2O diff | 6.73           | 7.67           | 5.70           | 6.23           | 5.60           | 4.57           | 5.51           | 5.70           | 4.87           | 4.18           | 4.91           | 5.85           | 4.43           |

| MUESTRA  | CU1561<br>>250 | CU1561<br>>250 | CU1561<br>>250 | CU1561<br>>250 | CU1561<br>>250 | CU1561<br>>250 | CU1561<br>>250 | CU1561<br>>250 | CU1561<br>>250 | CU1562<br>>250 | CU1562<br>>250 | CU1562<br>>250 | CU1562<br>>250 | CU1562<br>>250 |
|----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| SECTOR   | Cochiguás      | Cochiguás      | Cochiguás      | Cochiguás      | Cochiguás      | Cochiguás      | Cochiguás      | Cochiguás      | Cochiguás      | Cochiguás      | Cochiguás      | Cochiguás      | Cochiguás      | Cochiguás      |
| SIO2 %   | 72.59          | 72.75          | 74.43          | 72.49          | 72.12          | 72.26          | 72.23          | 72.52          | 70.74          | 70.69          | 69.74          | 70.72          | 70.65          |                |
| Al2O3 %  | 13.03          | 12.83          | 12.79          | 12.41          | 12.55          | 12.44          | 12.54          | 12.90          | 12.59          | 12.35          | 12.33          | 12.58          | 12.54          |                |
| FeO%     | 0.58           | 0.59           | 0.54           | 0.61           | 0.60           | 0.55           | 0.59           | 0.60           | 1.43           | 1.37           | 1.42           | 1.46           | 1.33           |                |
| MnO%     | 0.05           | 0.08           | 0.08           | 0.07           | 0.02           | 0.11           | 0.04           | 0.08           | 0.00           | 0.03           | 0.01           | 0.04           | 0.03           |                |
| MgO%     | 0.09           | 0.09           | 0.08           | 0.08           | 0.11           | 0.12           | 0.11           | 0.11           | 0.19           | 0.18           | 0.18           | 0.19           | 0.15           |                |
| CaO%     | 0.42           | 0.48           | 0.44           | 0.44           | 0.48           | 0.47           | 0.46           | 0.45           | 0.57           | 0.56           | 0.65           | 0.68           | 0.62           |                |
| Na2O%    | 5.18           | 4.60           | 4.33           | 4.60           | 4.57           | 4.72           | 4.04           | 4.47           | 3.96           | 3.82           | 3.83           | 3.73           | 3.90           |                |
| K2O%     | 3.80           | 3.85           | 3.91           | 3.65           | 3.61           | 3.60           | 3.80           | 3.77           | 5.26           | 5.33           | 5.16           | 5.23           | 5.16           |                |
| TiO2%    | 0.10           | 0.08           | 0.10           | 0.08           | 0.10           | 0.09           | 0.10           | 0.09           | 0.32           | 0.37           | 0.41           | 0.35           | 0.34           |                |
| P2O5%    | 0.03           | 0.02           | 0.06           | 0.04           | 0.06           | 0.04           | 0.19           | 0.04           | 0.03           | 0.05           | 0.04           | 0.03           | 0.05           |                |
| H2O diff | 4.03           | 4.56           | 3.16           | 5.42           | 5.67           | 5.49           | 5.80           | 4.89           | 4.69           | 5.07           | 6.03           | 4.80           | 5.03           |                |

| MUESTRA  | CU1562<br>>250 | CU1562<br>>250 | CU1562<br>>250 | CU1563<br>>250 | CU1563<br>>250 | CU1563<br>>250 | CU1563<br>>250 | CU1563<br>>250 | CU1563<br>>250 | CU1563<br>>250 | CU1564 >250          | CU1564 >250          |
|----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------------|----------------------|
| SECTOR   | Cochiguás      | Cochiguás      | Cochiguás      | Cochiguás      | Cochiguás      | Cochiguás      | Cochiguás      | Cochiguás      | Cochiguás      | Cochiguás      | Quebrada<br>Paihuano | Quebrada<br>Paihuano |
| SIO2 %   | 70.50          | 71.06          | 70.66          | 70.49          | 71.39          | 71.92          | 70.45          | 71.02          | 71.57          | 70.01          | 71.15                | 70.12                |
| Al2O3 %  | 12.30          | 12.72          | 12.58          | 13.00          | 13.16          | 12.84          | 12.87          | 13.20          | 13.22          | 13.27          | 12.79                | 12.24                |
| FeO%     | 1.38           | 1.46           | 1.40           | 1.10           | 1.13           | 1.08           | 1.16           | 1.13           | 1.13           | 1.17           | 1.38                 | 1.47                 |
| MnO%     | 0.00           | 0.01           | 0.04           | 0.03           | 0.04           | 0.04           | 0.06           | 0.02           | 0.03           | 0.03           | 0.09                 | 0.02                 |
| MgO%     | 0.17           | 0.18           | 0.19           | 0.14           | 0.13           | 0.16           | 0.15           | 0.16           | 0.14           | 0.16           | 0.21                 | 0.20                 |
| CaO%     | 0.62           | 0.66           | 0.59           | 0.81           | 0.80           | 0.76           | 0.76           | 0.74           | 0.77           | 0.72           | 0.50                 | 0.52                 |
| Na2O%    | 3.47           | 4.26           | 4.19           | 4.08           | 3.46           | 3.56           | 3.52           | 3.84           | 3.97           | 3.46           | 3.83                 | 3.90                 |
| K2O%     | 5.39           | 5.07           | 5.06           | 5.11           | 5.11           | 5.19           | 5.20           | 5.04           | 5.03           | 5.12           | 4.99                 | 5.03                 |
| TiO2%    | 0.31           | 0.36           | 0.36           | 0.21           | 0.23           | 0.19           | 0.21           | 0.20           | 0.22           | 0.22           | 0.36                 | 0.38                 |
| P2O5%    | 0.03           | 0.04           | 0.04           | 0.04           | 0.03           | 0.06           | 0.04           | 0.04           | 0.02           | 0.04           | 0.09                 | 0.02                 |
| H2O diff | 5.64           | 4.00           | 4.69           | 4.82           | 4.35           | 4.06           | 5.45           | 4.46           | 3.74           | 5.63           | 4.36                 | 5.93                 |

| MUESTRA  | CU1564 >250       | CU1564 >250       | CU1564 >250       | CU1564 >250       | CU1564 >250       | CU1564 >250       | CU1564 >250       | CU1564 >250       | CU1566 >250 |
|----------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------|
| SECTOR   | Quebrada Paihuano | Quebrada Paihuano | Quebrada Paihuano | Quebrada Paihuano | Quebrada Paihuano | Quebrada Paihuano | Quebrada Paihuano | Quebrada Paihuano | Tres Cruces |
| SIO2 %   | 71.27             | 70.92             | 71.14             | 70.94             | 71.32             | 71.36             | 71.01             | 70.95             | 72.50       |
| Al2O3 %  | 12.55             | 12.67             | 12.42             | 12.59             | 12.40             | 12.57             | 12.61             | 12.34             | 12.38       |
| FeO%     | 1.40              | 1.35              | 1.32              | 1.49              | 1.42              | 1.42              | 1.32              | 1.34              | 0.59        |
| MnO%     | 0.05              | 0.03              | 0.01              | 0.05              | 0.05              | 0.03              | 0.02              | 0.02              | 0.04        |
| MgO%     | 0.16              | 0.19              | 0.17              | 0.19              | 0.18              | 0.18              | 0.19              | 0.20              | 0.10        |
| CaO%     | 0.52              | 0.54              | 0.53              | 0.54              | 0.55              | 0.56              | 0.55              | 0.60              | 0.41        |
| Na2O%    | 4.40              | 4.31              | 3.58              | 4.34              | 4.63              | 4.43              | 4.44              | 4.16              | 4.46        |
| K2O%     | 5.11              | 5.03              | 5.14              | 5.22              | 5.19              | 5.18              | 5.21              | 5.25              | 3.75        |
| TiO2%    | 0.36              | 0.29              | 0.35              | 0.36              | 0.34              | 0.34              | 0.37              | 0.37              | 0.10        |
| P2O5%    | 0.04              | 0.02              | 0.03              | 0.01              | 0.03              | 0.04              | 0.03              | 0.03              | 0.05        |
| H2O diff | 3.94              | 4.45              | 5.12              | 4.06              | 3.69              | 3.70              | 4.05              | 4.54              | 5.52        |

| MUESTRA  | CU1566<br>>250 | CU1566<br>>250 | CU1566<br>>250 | CU1566<br>>250 | CU1566<br>>250 | CU1566<br>>250 | CU1566<br>>250 | CU1566<br>>250 | CU1566<br>>250 | CU1566<br>>250 | CU1566<br>>250 |
|----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| SECTOR   | Tres Cruces    | Tres Cruces    | Tres Cruces    | Tres Cruces    | Tres Cruces    | Tres Cruces    | Tres Cruces    | Tres Cruces    | Tres Cruces    | Tres Cruces    | Tres Cruces    |
| SIO2 %   | 72.11          | 73.27          | 73.19          | 72.66          | 73.03          | 73.04          | 72.78          | 72.88          | 73.29          | 72.50          | 73.02          |
| Al2O3 %  | 12.39          | 12.87          | 12.59          | 12.60          | 12.79          | 12.78          | 12.58          | 13.10          | 12.76          | 12.60          | 12.84          |
| FeO%     | 0.56           | 0.54           | 0.55           | 0.57           | 0.58           | 0.59           | 0.58           | 0.58           | 0.59           | 0.59           | 0.54           |
| MnO%     | 0.07           | 0.09           | 0.04           | 0.05           | 0.06           | 0.04           | 0.06           | 0.06           | 0.04           | 0.08           | 0.06           |
| MgO%     | 0.10           | 0.11           | 0.12           | 0.12           | 0.08           | 0.10           | 0.11           | 0.09           | 0.10           | 0.10           | 0.12           |
| CaO%     | 0.45           | 0.43           | 0.50           | 0.53           | 0.49           | 0.47           | 0.47           | 0.46           | 0.46           | 0.50           | 0.50           |
| Na2O%    | 4.28           | 4.23           | 4.31           | 4.38           | 4.27           | 4.04           | 4.03           | 3.78           | 4.25           | 5.02           | 4.18           |
| K2O%     | 3.74           | 3.92           | 4.02           | 4.00           | 3.84           | 4.04           | 3.99           | 3.83           | 4.01           | 3.81           | 3.95           |
| TiO2%    | 0.08           | 0.10           | 0.10           | 0.10           | 0.10           | 0.10           | 0.09           | 0.10           | 0.09           | 0.10           | 0.12           |
| P2O5%    | 0.03           | 0.02           | 0.07           | 0.06           | 0.06           | 0.05           | 0.04           | 0.03           | 0.04           | 0.03           | 0.02           |
| H2O diff | 6.08           | 4.32           | 4.41           | 4.85           | 4.61           | 4.69           | 5.16           | 5.02           | 4.30           | 4.58           | 4.58           |

## ANEXO IV

En este anexo se presentan los datos de geoquímica de elementos mayores utilizados para establecer las comparaciones entre los depósitos de este estudio y los depósitos de tefra asociados al evento eruptivo Caldera El Diamante y los depósitos del Campo Volcánico Pocho.

| TRABAJO                          | Zavala, 2017           | Zavala, 2017           | Zavala, 2017           | Troncoso, 2015         | Troncoso, 2015         | Troncoso, 2015         | Troncoso, 2015         | Sruoga, 2005           |
|----------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| MUESTRA                          | IPZ6-C2B               | IPZ6-C1C               | IPZ6-3B                | CT2911115PA            | CT031111-2PA           | CT041111-1PA           | CT041111-2PA           | ID                     |
| SECTOR                           | Ignimbrita<br>Pudahuel | Ignimbrita<br>Pudahuel | Ignimbrita<br>Pudahuel | Ignimbrita<br>Pudahuel | Ignimbrita<br>Pudahuel | Ignimbrita<br>Pudahuel | Ignimbrita<br>Pudahuel | Ignimbrita<br>Diamante |
| SiO <sub>2</sub> %               | 72.73                  | 73.59                  | 72.46                  | 69.02                  | 71.63                  | 71.97                  | 72.4                   | 74.29                  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> % | 13.19                  | 12.98                  | 12.76                  | 12.82                  | 12.53                  | 12.89                  | 12.72                  | 13.14                  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> % | 0.98                   | 0.78                   | 0.81                   | 1.35                   | 1.13                   | 1.08                   | 1.06                   | 0.96                   |
| MnO%                             | 0.08                   | 0.07                   | 0.07                   | 0.07                   | 0.08                   | 0.08                   | 0.08                   | 0.08                   |
| MgO%                             | 0.19                   | 0.14                   | 0.18                   | 0.5                    | 0.26                   | 0.18                   | 0.15                   | 0.19                   |
| CaO%                             | 1                      | 0.59                   | 0.62                   | 1.17                   | 0.7                    | 0.65                   | 0.58                   | 0.66                   |
| Na <sub>2</sub> O%               | 3.39                   | 3.59                   | 2.69                   | 2.93                   | 3.55                   | 3.18                   | 3.34                   | 3.97                   |
| K <sub>2</sub> O%                | 4.7                    | 4.49                   | 5.23                   | 4.88                   | 4.58                   | 4.64                   | 4.65                   | 4.52                   |
| TiO <sub>2</sub> %               | 0.14                   | 0.11                   | 0.11                   | 0.13                   | 0.11                   | 0.12                   | 0.11                   | 0.12                   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %  | 0.04                   | 0.03                   | 0.03                   | 0.04                   | 0.04                   | 0.04                   | 0.04                   | 0.05                   |
| LOI                              | 3.4                    | 3.5                    | 4.9                    | 9                      | 5.1                    | 5.3                    | 4.8                    | 2.96                   |

| TRABAJO                          | Polanski, 1962         | Stern, 1984            | Hynek, 2010      | Hynek, 2010      | Hynek, 2010      | Hynek, 2010      | Hynek, 2010      | Hynek, 2010      | Hynek, 2010      |
|----------------------------------|------------------------|------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| MUESTRA                          | Polanski 1962          | Stern 1984             | MEN 08           | MEN 08a          | MEN 09           | MEN 10           | MEN 10a          | MEN 11           | MEN 12.1         |
| SECTOR                           | Ignimbrita<br>Pudahuel | Ignimbrita<br>Pudahuel | Toba<br>Diamante | Toba<br>Diamante | Toba<br>Diamante | Toba<br>Diamante | Toba<br>Diamante | Toba<br>Diamante | Toba<br>Diamante |
| SiO <sub>2</sub> %               | 72.5                   | 75                     | 75.2             | 74.7             | 75.1             | 75.1             | 74.4             | 74.8             | 75.1             |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> % | 13.2                   | 13.2                   | 12.6             | 12.8             | 12.4             | 12.8             | 12.8             | 13               | 12.8             |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> % | 13.2                   | 12.6                   | 12.8             | 12.4             | 12.8             | 12.8             | 13               | 12.8             | 12.7             |
| MnO%                             | 1.1                    | 0.9                    | 0.59             | 0.62             | 0.53             | 0.5              | 0.49             | 0.41             | 0.58             |
| MgO%                             | 0.1                    |                        | 0.063            | 0.075            | 0.077            | 0.052            | 0.056            | 0.051            | 0.069            |
| CaO%                             | 0.6                    | 0.17                   | 0.1              | 0.1              | 0.1              | 0.1              | 0.1              | 0.1              | 0.1              |
| Na <sub>2</sub> O%               | 0.9                    | 0.45                   | 0.47             | 0.47             | 0.52             | 0.53             | 0.54             | 0.51             | 0.47             |
| K <sub>2</sub> O%                | 3.9                    | 4.1                    | 4.3              | 4.3              | 4.3              | 4.4              | 4.4              | 4.3              | 4.3              |
| TiO <sub>2</sub> %               | 0.2                    | 0.12                   | 0.1              | 0.1              | 0.09             | 0.1              | 0.09             | 0.08             | 0.09             |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %  |                        |                        |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| H <sub>2</sub> O                 | 2.9                    | 3.2                    | 2.8              | 3.5              | 2.7              | 2.7              | 3.2              | 2.8              | 2.7              |

| TRABAJO                          | Hynek, 2010      | Hynek, 2010      | Hynek, 2010      | Hynek, 2010      | Hynek, 2010      | Hynek, 2010      | Hynek, 2010      | Hynek, 2010      | Hynek, 2010      | Hynek, 2010      |
|----------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| MUESTRA                          | MEN 12.2         | MEN 12.3         | MEN 12.4         | MEN 13.1         | MEN 13.2         | MEN 13.3         | MEN 14.1         | MEN 14.2         | MEN 14.3         | Welded           |
| SECTOR                           | Toba<br>Diamante | Toba<br>Diamante | Toba<br>Diamante | Toba<br>Diamante | Toba<br>Diamante | Toba<br>Diamante | Toba<br>Diamante | Toba<br>Diamante | Toba<br>Diamante | Toba<br>Diamante |
| SiO <sub>2</sub> %               | 74.4             | 74.8             | 74.2             | 74.6             | 75               | 74.9             | 74.7             | 74.7             | 74.7             | 74.3             |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> % | 12.7             | 12.7             | 12.7             | 12.7             | 12.8             | 12.7             | 12.8             | 12.8             | 12.7             | 12.7             |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> % | 12.7             | 12.7             | 12.7             | 12.8             | 12.7             | 12.8             | 12.8             | 12.7             | 12.7             | 12.7             |
| MnO%                             | 0.59             | 0.61             | 0.6              | 0.65             | 0.67             | 0.66             | 0.14             | 0.22             | 0.25             | 0.19             |
| MgO%                             | 0.095            | 0.074            | 0.055            | 0.071            | 0.065            | 0.082            | 0.044            | 0.035            | 0.052            | 0.041            |
| CaO%                             | 0.11             | 0.11             | 0.11             | 0.1              | 0.1              | 0.1              | 0.06             | 0.06             | 0.06             | 0.06             |
| Na <sub>2</sub> O%               | 0.48             | 0.46             | 0.51             | 0.47             | 0.44             | 0.47             | 0.57             | 0.43             | 0.51             | 0.41             |
| K <sub>2</sub> O%                | 4.2              | 4.3              | 4.4              | 4.3              | 4.3              | 4.4              | 4.6              | 5                | 4.6              | 4.7              |
| TiO <sub>2</sub> %               | 0.07             | 0.1              | 0.07             | 0.1              | 0.1              | 0.11             | 0.12             | 0.11             | 0.12             | 0.11             |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| H <sub>2</sub> O                 | 3.2              | 2.8              | 3.2              | 3.2              | 3                | 2.8              | 3.1              | 2.8              | 2.9              | 3.7              |



| TRABAJO | Hynek, 2010   | Hynek, 2010   | Hynek, 2010   | Hynek, 2010   | Hynek, 2010   | Hynek, 2010   | Hynek, 2010   |
|---------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| MUESTRA | Fiamme        | Men139 m1     | Men 139 m2    | Men 154       | Men 161       | Men 166       | Men 166a      |
| SECTOR  | Toba Diamante | Toba Diamante | Toba Diamante | Toba Diamante | Toba Diamante | Toba Diamante | Toba Diamante |
| SIO2%   | 74.1          | 74.6          | 71            | 74.7          | 75            | 75.1          | 74.1          |
| Al2O3%  | 12.7          | 13.1          | 14.2          | 13.2          | 13.2          | 12.9          | 13.1          |
| Fe2O3%  | 12.7          | 0.68          | 1.76          | 0.67          | 0.88          | 0.67          | 0.65          |
| MnO%    | 0.13          | 0.085         | 0.067         | 0.076         | 0.065         | 0.078         | 0.079         |
| MgO%    | 0.033         | 0.11          | 0.29          | 0.1           | 0.1           | 0.11          | 0.1           |
| CaO%    | 0.06          | 0.49          | 1.2           | 0.49          | 0.55          | 0.53          | 0.052         |
| Na2O%   | 0.41          | 2.6           | 3.9           | 4             | 3.9           | 3.9           | 3.8           |
| K2O%    | 4.6           | 4.2           | 4.4           | 4.3           | 4.4           | 4.3           | 4.4           |
| TiO2%   | 0.11          | 0.11          | 0.3           | 0.09          | 0.11          | 0.11          | 0.11          |
| P2O5%   |               |               |               |               |               |               |               |
| H2O     | 3.9           | 3.3           | 4.1           | 2.4           | 2.1           | 3             | 3.3           |

|                                  |                          |                          |                          |                          |                          |                          |
|----------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| TRABAJO                          | Kay y Gordillo, 1994     | Kay y Gordillo, 1994     | Kay y Gordillo, 1994     | Kay y Gordillo, 1994     | Kay y Gordillo, 1994     | Kay y Gordillo, 1994     |
| MUESTRA                          | P10A                     | YB2                      | P2B                      | P5                       | CB2                      | CB1                      |
| SECTOR                           | Campo Volcánico<br>Pocho | Campo Volcánico<br>Pocho | Campo Volcánico<br>Pocho | Campo Volcánico<br>Pocho | Campo Volcánico<br>Pocho | Campo Volcánico<br>Pocho |
| SiO <sub>2</sub> %               | 53.12                    | 56.06                    | 56.66                    | 56.60                    | 56.38                    | 56.40                    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> % | 18.18                    | 18.14                    | 18.29                    | 17.58                    | 7.77                     | 18.03                    |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> % | 9.07                     | 6.81                     | 6.15                     | 7.07                     | 0.12                     | 7.44                     |
| MnO%                             | 0.13                     | 0.11                     | 0.10                     | 0.11                     | 7.77                     | 0.12                     |
| MgO%                             | 2.73                     | 2.31                     | 2.36                     | 2.24                     | 0.12                     | 2.63                     |
| CaO%                             | 9.03                     | 7.69                     | 7.31                     | 7.34                     | 2.77                     | 7.34                     |
| Na <sub>2</sub> O%               | 3.89                     | 4.29                     | 4.90                     | 4.04                     | 7.59                     | 3.81                     |
| K <sub>2</sub> O%                | 2.52                     | 2.57                     | 2.87                     | 2.81                     | 4.06                     | 2.63                     |
| TiO <sub>2</sub> %               | 1.26                     | 0.90                     | 0.79                     | 0.85                     | 0.81                     | 0.83                     |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %  | 0.61                     | 0.36                     | 0.42                     | 0.33                     | 0.39                     | 0.30                     |

|                                  |                          |                          |                          |                          |                          |                          |
|----------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| TRABAJO                          | Kay Y Gordillo, 1994     | Kay Y Gordillo, 1994     | Kay Y Gordillo, 1994     | Kay Y Gordillo, 1994     | Kay Y Gordillo, 1994     | Kay Y Gordillo, 1994     |
| MUESTRA                          | L3B                      | L1                       | CAC                      | LC3B                     | CC1                      | LC1                      |
| SECTOR                           | Campo Volcánico<br>Pocho | Campo Volcánico<br>Pocho | Campo Volcánico<br>Pocho | Campo Volcánico<br>Pocho | Campo Volcánico<br>Pocho | Campo Volcánico<br>Pocho |
| SiO <sub>2</sub> %               | 60.41                    | 60.88                    | 66.97                    | 60.96                    | 60.63                    | 63.25                    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> % | 18.45                    | 18.58                    | 17.88                    | 16.25                    | 18.20                    | 18.57                    |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> % | 5.13                     | 4.95                     | 2.00                     | 4.92                     | 5.14                     | 3.99                     |
| MnO%                             | 0.08                     | 0.08                     | 0.03                     | 0.13                     | 0.08                     | 0.06                     |
| MgO%                             | 1.39                     | 1.27                     | 0.30                     | 2.80                     | 1.53                     | 0.53                     |
| CaO%                             | 6.03                     | 5.96                     | 4.29                     | 5.93                     | 5.90                     | 5.53                     |
| Na <sub>2</sub> O%               | 4.59                     | 4.67                     | 5.06                     | 4.11                     | 4.69                     | 4.49                     |
| K <sub>2</sub> O%                | 2.85                     | 2.64                     | 3.11                     | 3.49                     | 3.24                     | 3.13                     |
| TiO <sub>2</sub> %               | 0.65                     | 0.60                     | 0.27                     | 0.52                     | 0.66                     | 0.43                     |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %  | 0.25                     | 0.17                     |                          | 0.27                     | 0.22                     | 0.09                     |

| TRABAJO                          | Kay Y Gordillo, 1994  | Kay Y Gordillo, 1994  | Kay Y Gordillo, 1994  | Kay Y Gordillo, 1994  | Kay Y Gordillo, 1994  | Kay Y Gordillo, 1994  |
|----------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| MUESTRA                          | L2B                   | CC2B                  | VE1                   | CB6                   | CC2C                  | V2                    |
| SECTOR                           | Campo Volcánico Pocho | Campo Volcánico Pocho | Campo Volcánico Pocho | Campo Volcánico Pocho | Campo Volcánico Pocho | Campo Volcánico Pocho |
| SiO <sub>2</sub> %               | 51.73                 | 54.08                 | 58.70                 | 59.93                 | 61.33                 | 62.82                 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> % | 16.37                 | 18.12                 | 18.22                 | 18.75                 | 18.30                 | 18.00                 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> % | 8.39                  | 8.09                  | 5.32                  | 5.12                  | 4.30                  | 3.66                  |
| MnO%                             | 0.14                  | 0.14                  | 0.08                  | 0.08                  | 0.08                  | 0.06                  |
| MgO%                             | 3.34                  | 2.46                  | 1.70                  | 1.37                  | 1.22                  | 0.88                  |
| CaO%                             | 9.33                  | 7.95                  | 5.77                  | 5.37                  | 4.91                  | 4.94                  |
| Na <sub>2</sub> O%               | 3.43                  | 3.76                  | 4.26                  | 4.65                  | 4.81                  | 4.43                  |
| K <sub>2</sub> O%                | 2.99                  | 2.97                  | 4.05                  | 4.17                  | 4.35                  | 4.25                  |
| TiO <sub>2</sub> %               | 1.12                  | 1.09                  | 0.66                  | 0.62                  | 0.62                  | 0.54                  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %  | 0.47                  | 0.45                  | 0.20                  | 0.19                  | 0.19                  | 0.10                  |

| TRABAJO                          | Kay Y Gordillo, 1994  | Kay Y Gordillo, 1994  | Kay Y Gordillo, 1994  |
|----------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| MUESTRA                          | V5                    | CB3                   | CC3                   |
| SECTOR                           | Campo Volcánico Pocho | Campo Volcánico Pocho | Campo Volcánico Pocho |
| SiO <sub>2</sub> %               | 63.45                 | 64.13                 | 67.50                 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> % | 18.02                 | 17.64                 | 17.59                 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> % | 3.24                  | 3.68                  | 2.28                  |
| MnO%                             | 0.06                  | 0.06                  | 0.04                  |
| MgO%                             | 0.75                  | 0.72                  | 0.24                  |
| CaO%                             | 5.12                  | 3.77                  | 2.22                  |
| Na <sub>2</sub> O%               | 4.53                  | 5.02                  | 4.88                  |
| K <sub>2</sub> O%                | 4.14                  | 4.29                  | 4.87                  |
| TiO <sub>2</sub> %               | 0.48                  | 0.48                  | 0.30                  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %  | 0.14                  | 0.13                  | 0.04                  |